



UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE CATALUNYA
BARCELONATECH

Escola Tècnica Superior d'Enginyeries
Industrial i Aeronàutica de Terrassa

Titulació:

ENGINYERIA INDUSTRIAL

.....

Alumne:

GERARD CEDÓ OLIVÉ

.....

Títol PFC:

ESTUDI ENERGÈTIC D'UN COTXE HÍBRID ELÈCTRIC

.....

Director del PFC:

JOSEBA QUEVEDO CASIN

.....

Convocatòria de lliurament del PFC:

ABRIL 2016



UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE CATALUNYA
BARCELONATECH

Escola Tècnica Superior d'Enginyeries
Industrial i Aeronàutica de Terrassa

Índex

1.	Introducció	1
1.1	Objecte de l'estudi	1
1.2	Antecedents de l'estudi.....	1
1.3	Justificació de l'estudi	2
1.4	Abast de l'estudi	3
2	Anàlisi de l'entorn del cotxe híbrid elèctric	4
2.1	Relació entre el consum d'energia i la creació de riquesa	4
2.2	La contaminació provocada pel transport	7
2.3	Fonts d'energia del vehicle híbrid elèctric	13
3	Tipus de vehicles híbrids elèctrics	19
3.1	Vehicle híbrid elèctric amb configuració del tren de potència en sèrie ..	22
3.2	Vehicle híbrid elèctric amb configuració del tren de potència en paral·lel ..	25
3.3	Vehicle híbrid elèctric amb configuració del tren de potència en sèrie-paral·lel	29
3.4	Concepte d'hibridació i vehicle amb hibridació parcial	29
3.5	Vehicle híbrid elèctric endollable	30
4	Simulador del vehicle híbrid elèctric.....	33
4.1	Bloc conductor (<i>Driver block</i>).....	35
4.2	Convertidor senyal – força (<i>Signal-force converter</i>)	37
4.3	Distribució de força (<i>Distribution of force</i>)	40
4.4	Parell del motor de combustió (<i>Engine torque</i>)	43
4.5	Sistema motor de combustió (<i>Engine</i>)	45
4.6	Sistema parell elèctric (<i>Electric torque</i>).....	49
4.7	Sistema motor elèctric (<i>Electric motor</i>)	50
4.8	Sistema dinàmica del vehicle (<i>Vehicle Dynamics</i>)	53
4.9	Sistema mode d'operació (<i>Operation mode</i>).....	58
4.10	Sistema de transmissió (<i>Transmission</i>)	65
4.11	Bloc sensor de velocitat (<i>Sensor block</i>)	67
4.12	Sistema de frenada regenerativa (<i>Brakes System</i>).....	67
4.13	Sistema bateria (<i>Electric System</i>)	70

5	Resultats de les simulacions.....	74
5.1	Paràmetres d'entrada comuns.....	75
5.2	Anàlisi del funcionament del simulador.....	79
5.3	Anàlisi de l'estratègia energètica del vehicle.....	83
5.4	Anàlisi dels diferents tipus de vehicles.....	88
5.5	Anàlisi de la fidelitat del model creat.....	90
6	Conclusions	93
7	Recomanacions per a treballs futurs.....	95
8	Valoració econòmica de l'estudi.....	96
9	Bibliografia consultada.....	97
ANNEXES	100
ANNEX I:	Recorregut del vehicle	101
ANNEX II:	Controlador PID.....	102
ANNEX III:	Dinàmica del vehicle.....	105

1. Introducció

1.1 Objecte de l'estudi

L'objectiu del present estudi és analitzar i comprendre el comportament energètic d'un vehicle híbrid elèctric, mitjançant la creació i la simulació d'un model dinàmic utilitzant l'entorn de programació visual SIMULINK®, del programa informàtic MATLAB®.

1.2 Antecedents de l'estudi

El cotxe híbrid elèctric té una llarga història. Ja en el any 1901 la marca Lohner-Porsche desenvolupa el primer cotxe híbrid elèctric de la història.

En un context de preus elevats dels combustibles i un augment considerat de la sensibilització de la societat pels problemes mediambientals del planeta, Toyota llança al mercat l'any 1997 el model Prius i Honda el Insight poc després, generant un fort impacte en el mercat de l'automòbil, marcant l'inici d'un nou segment en el mercat de l'automòbil i suposant l'inici del desenvolupament dels cotxes híbrids elèctrics moderns actuals.

Des de llavors s'han venut en tot el món al voltant de 10 milions de *VHEs*, xifra aconseguida en el mes de Juliol de 2015.

Els avantatges d'aquests vehicles respecte als convencionals en referència a l'estalvi en el consum de combustible són clars, sobretot pel que fa als cicles de conducció urbans.

La primera generació del model Prius aconseguia un consum estimat de combustible de 4,5 l / 100 km en cicle urbà i de 5,2 l / 100 km en cicle extra urbà. Els valors pel que fa al model Insight es situaven als 3,9 l / 100 km en el cicle urbà i 3,5 l / 100 km per conducció extra urbana.

Tot i aquestes xifres, la quota de mercat dels *VHEs* està lluny de les xifres de vendes dels vehicles convencional. El rànquing per països es liderat pel Japó, on la quota de mercat se situa al voltant del 30% de totes les vendes de nous turismes. Pel que fa a Europa, Holanda lidera el rànquing amb una quota de

mercat al voltant del 4,5% de totes les vendes, degut principalment als incentius fiscals i a les polítiques mediambientals del país.

Pel que fa a Espanya, durant l'any 2012, les vendes de vehicles híbrids elèctrics van representar tant sols el 1,44% del total de les vendes de turismes nous. [1]

1.3 Justificació de l'estudi

L'ús de l'energia d'una manera més sostenible és un factor clau per solucionar els problemes mediambientals del present i del futur del planeta.

La tecnologia incorporada en els vehicles híbrids elèctrics permet un ús més racional i sostenible de l'energia, mitjançant l'optimització en la combinació de les diferents fonts d'energia que incorpora el vehicle.

Els programes de simulació són necessaris en el moment de dissenyar aquests vehicles amb l'objectiu de configurar el cotxe de tal manera que pugui proporcionar la màxima eficiència al llarg de qualsevol escenari de conducció previst pel vehicle.

En el context actual de canvi climàtic, de gran dependència al petroli, d'augment constant dels preus dels combustibles derivats del petroli, de polítiques de pressions fiscals per contaminar i de les encara limitacions de les bateries elèctriques, la millora en l'eficiència energètica dels vehicles agafa cada cop més importància i el cotxe híbrid elèctric juga un paper clau en l'eficiència energètica del transport.

Es preveu que per a l'any 2020, les vendes globals de cotxes híbrids elèctrics i endollables arribin als 6,6 milions d'unitats anuals, suposant el 7% del mercat dels vehicles lleugers. [2]

L'increment de la demanda en el mercat dels vehicles híbrids elèctrics, comporta un esforç d'aprenentatge i d'especialització per part dels enginyers en aquest camp d'estudi.

Més enllà de la millora en l'eficiència energètica dels diferents components que formen part d'un vehicle, la interacció entre aquests components i la eficiència del sistema sencer és un factor clau pel que fa als cotxes híbrids elèctrics.

Entendre el flux de potència que es transmet d'un component a un altre, millora l'habilitat de desenvolupar vehicles híbrids elèctrics més eficients.

D'altra banda, les eines de simulació interactiva permetent la comprensió de problemes tècnics complexos.

Així doncs, basat en aquesta idea, neix la necessitat de desenvolupar una eina interactiva per a finalitats educatives, en l'entorn MATLAB/SIMULINK®, que permeti la configuració d'un model específic d'*VHE* i el seu anàlisi d'eficiència per a un cicle de conducció determinat i faciliti d'aquesta manera la comprensió de les tècniques de gestió energètica utilitzades en els cotxes híbrids elèctrics.

1.4 Abast de l'estudi

En la primera part d'aquest estudi s'analitzarà la situació energètica actual del transport i especialment del transport per carretera. També les fonts d'energia que s'utilitzen i les repercussions mediambientals i econòmiques que el transport té en l'actualitat.

Seguidament es revisarà la literatura existent pel que fa al vehicle híbrid elèctric actual, les configuracions més utilitzades, els seus components principals i com aquests es relacionen i es gestionen per tal d'aconseguir millores en l'eficiència energètica dels vehicles.

Tot seguit, es triarà una configuració híbrida i es desenvoluparà un model dinàmic d'un vehicle híbrid elèctric en l'entorn de programació visual MATLAB/SIMULINK®.

Un cop obtingut el model, es realitzaran un seguit de simulacions per comprovar el seu funcionament, així com per analitzar els paràmetres que afecten més en la gestió energètica del *VHE* a l'hora d'aconseguir millores en l'eficiència energètica global del vehicle.

Finalment s'obtidran una sèrie de conclusions de l'estudi realitzat.

2 Anàlisi de l'entorn del cotxe híbrid elèctric

Els dos principals problemes que afecten actualment al transport de persones i mercaderies són el gran consum d'energia requerit i la contaminació ambiental associada a aquest transport.

Són els dos reptes principals que avui en dia s'enfronta el transport en general i els cotxes en particular i l'ús dels cotxes híbrids elèctrics per al transport de persones enlloc dels convencionals és un bon mitjà per tal de reduir l'impacte del transport en l'entorn.

2.1 Relació entre el consum d'energia i la creació de riquesa

El consum d'energia per part d'un determinat col·lectiu d'individus està fortament lligat al nivell d'activitat econòmica de la zona d'influència d'aquest col·lectiu, ja sigui un país o regió.

Si ens fixem en el consum d'energia elèctrica durant la nit en el planeta Terra, en la [Imatge 2.1](#) següent, es pot veure clarament aquesta relació, on els països més desenvolupats consumeixen la major part de l'energia que es consumeix.

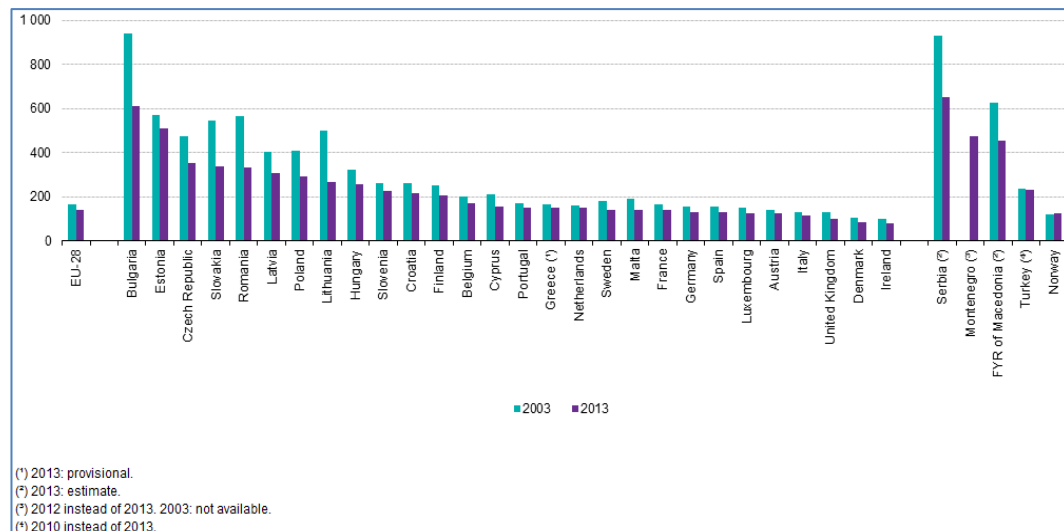


Imatge 2.1 Consum d'energia elèctrica en la Terra durant la nit [3]

El concepte d'*intensitat d'energia*, relaciona el consum d'energia amb la riquesa generada en una zona o un país i en els països industrialitzats és un bon indicador de l'eficiència energètica de la zona.

En la [Imatge 2.2](#) següent, es pot observar aquesta intensitat energètica en funció dels diferents productes interiors bruts dels països europeus.

Considerant aquest factor, Espanya es troba entre els 10 països més eficients energèticament d'Europa i per sota la mitjana europea. Cal dir però, que la estructura econòmica del país juga un paper clau en el valor d'aquesta intensitat, on les economies basades en els serveis mostraran valors més baixos d'intensitat que altres on el sector industrial és més important.

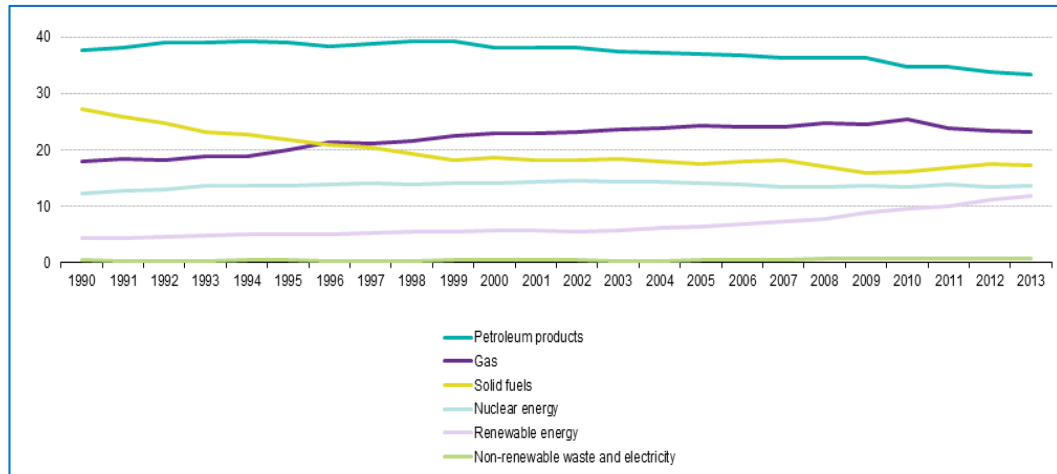


Imatge 2.2 Intensitat de l'energia en l'economia, (kg de petroli equivalent per 1000 EUR del PIB) [4]

El consum d'energia de la Unió Europea EU-28 durant el 2013 va ser de 1.666 milions de tones de petroli equivalent (TOE). Tot i que en els últims anys hi ha hagut un descens de l'energia consumida a Europa, com es el cas de l'any 2009 amb una baixada del 5,7%, el cert és que es atribuït a la crisi econòmica i financera dels últims anys i no a una millora en l'eficiència en el consum d'energia o a un canvi del model productiu. [4]

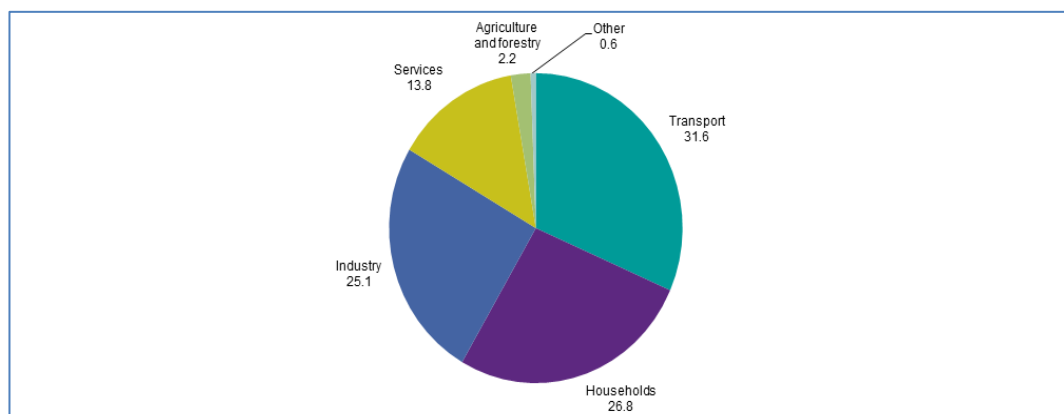
Durant l'any 2012, els nivells de consum es situaven similars als de l'any 1990 i el 2006 es va produir el pic màxim, amb un consum energètic de 1.832 milions de tones.

Com es pot veure en la següent [Imatge 2.3](#), la principal font d'energia de la Unió Europea prové del petroli, representant actualment al voltant del 33% del total de l'energia consumida.



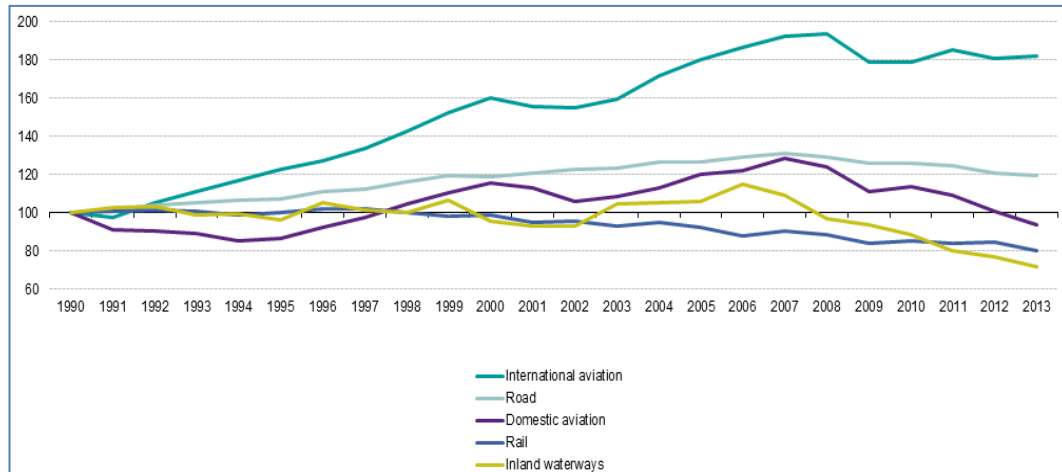
Imatge 2.3 Consum d'energia per origen, EU-28, 1990–2013 (% del consum total) [4]

Pel que fa als consums energètics per sectors, tal com mostra la [Imatge 2.4](#), el transport és el sector que més energia consumeix, amb un 31,6% del total, seguit de les llars i la indústria, amb un 26,8% i un 25,1% respectivament.



Imatge 2.4 Consum d'energia per sectors, EU-28, 2013 (% del total, basat en tones de petroli equivalent) [4]

Si entrem directament a valorar el sector transports, tal com es pot veure en la [Imatge 2.5](#), el mitjà aeri és el qui consumeix la major part d'energia i el transport per carretera, en el qual ens centrem en aquest estudi a través del vehicle híbrid elèctric, és el segon, amb aproximadament un 20% més de consum respecte de l'any 1990.



Imatge 2.5 Consum d'energia per mitjà de transport, EU-28, 1990–2013 (1990 = 100, basat en tones de petroli equivalent) [4]

2.2 La contaminació provocada pel transport

El transport i concretament els cotxes són els causants de molts dels problemes de contaminació que existeixen actualment en el planeta i causen seriosos problemes de salut a les persones.

Les principals emissions contaminants de l'aire provenen de la combustió en els cotxes amb motor de gasolina, gasoil i d'altres combustibles alternatius.

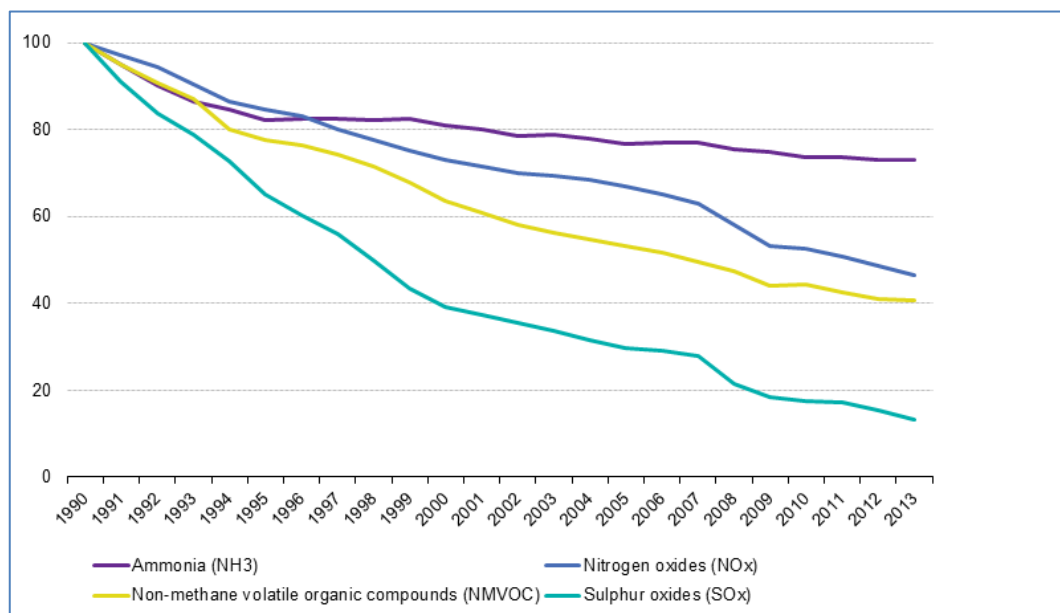
Aquestes emissions contaminants pel que fa als cotxes híbrids elèctrics, vehicles del tipus M1 (Vehicles destinats al transport de persones que tinguin, a més a més del seient del conductor, vuit places assentades com a màxim), estan regulades per la normativa europea en el Reglament (CE) N° 715/2007 del parlament europeu i el consell, sobre l'homologació de vehicles de motor pel que fa a emissions procedents de turismes y vehicles comercials (Euro 5 y Euro6). [5]

Aquests límits d'emissions són cada vegada més exigents, degut principalment a l'impacte del canvi climàtic, a l'augment de la sensibilitat de la societat pel respecte al medi ambient i als problemes greus de contaminació que presenten algunes zones urbanes.

Per a homologar els vehicles i comprovar que no superen els límits legals s'utilitzen tests estàndards en laboratoris homologats, basats en cicles de conducció estàndards.

Els contaminants de l'aire que es tenen en compte en les convencions internacionals són: els òxids de sofre (SO_x), l'amoníac (NH₃), els òxids de nitrogen (NO_x) i els compostos orgànics volàtils no metànics (COVNM). També es tenen en consideració els gasos d'efecte hivernacle i les partícules (PM).

Pel que fa als quatre primers, en els últims anys s'han reduït força, gràcies a les noves tecnologies incorporades als vehicles nous per tal de no sobrepassar els límits legals permesos i a la millora de la qualitat dels combustibles utilitzats. En la següent [imatge 2.6](#), es pot veure aquesta reducció.



Imatge 2.6 Emissions contaminants a l'aire, EU-28, 1990-2013 [6]

No obstant aquestes reduccions d'emissions a Europa, el parc d'automòbils i els quilometres recorreguts no paren de créixer any rere any i els danys ambientals tals com l'acidificació, l'eutrofització, els problemes d'ozó i la qualitat de l'aire reduïda, especialment a les zones urbanes encara són una realitat preocupant.

Del total de vehicles produïts per any, els turismes representen el 74%, la resta correspon a vehicles comercials lleugers, camions, autobusos i mini busos. El 2012, per primer cop a la història, es va superar la xifra de 60 milions de turismes produïts per any, dels quals un de cada quatre es produeix a la Xina. [7]

Si tenim en compte tots els tipus de vehicles de motor, a excepció dels vehicles de dos rodes, a continuació, en la figura següent, podem veure la tendència

mundial en la producció de turismes i vehicles comercials des dels anys seixanta.

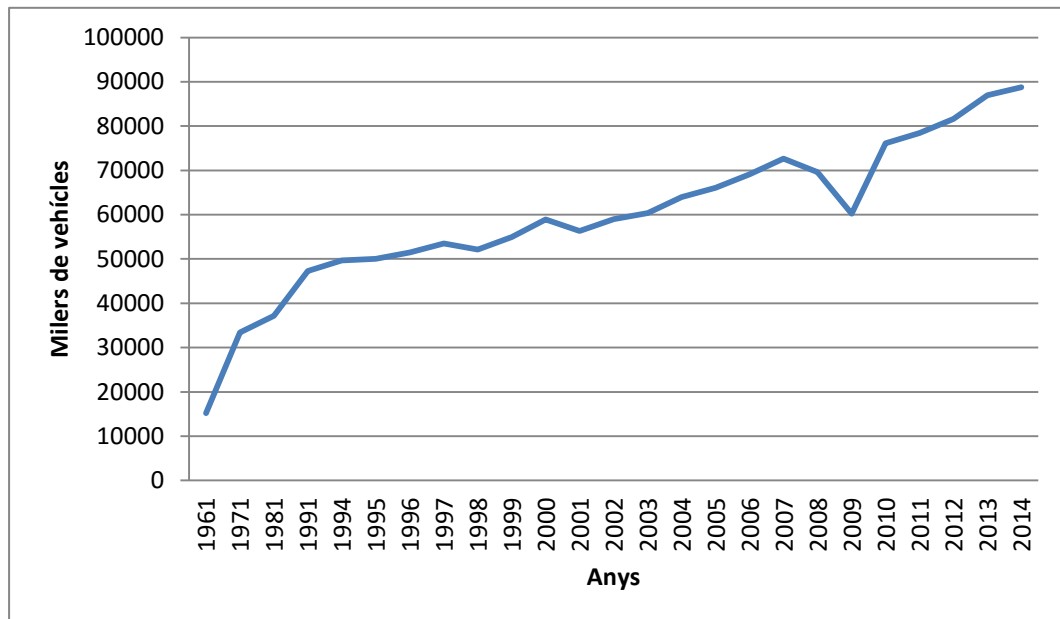
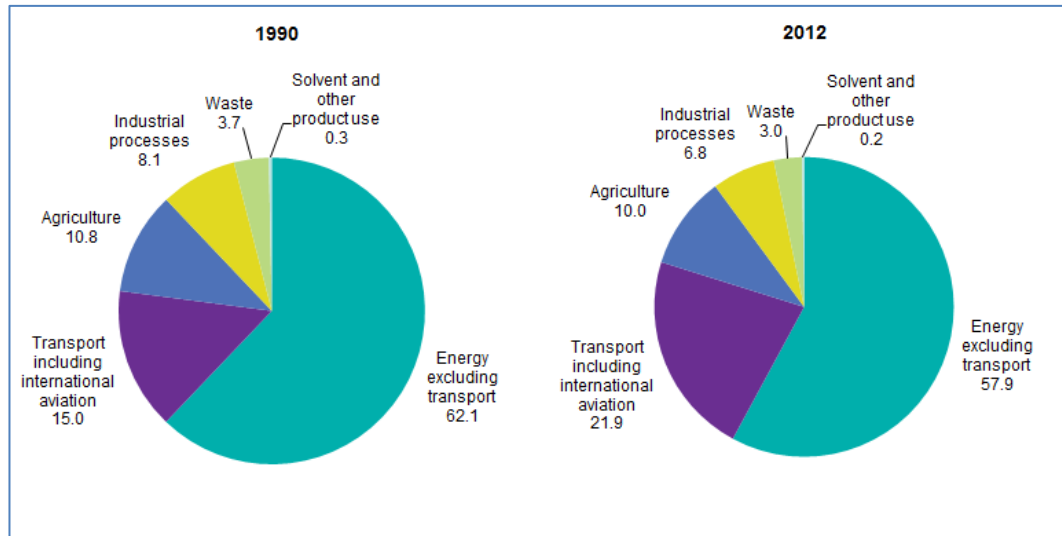


Figura 2.1 Producció de turismes i vehicles comercials per any (Milers de vehicles) [8]

Pel que fa a les partícules (PM), aquestes tenen un efecte perjudicial important per la salut de les persones, provocant problemes respiratoris i cardiovasculars i incrementen les al·lèrgies en les persones més sensibles. En els últims anys les partícules estan agafant cada vegada més protagonisme, degut principalment a l'augment significatiu dels vehicles amb motor de gasoil i com a resultat, els nivells màxims permesos en les normatives europees són cada vegada més exigents.

Qui centra però actualment tota l'atenció internacional en les convencions pel canvi climàtic són els gasos d'efecte hivernacle. Els gasos considerats en la convenció de Kyoto són: el diòxid de carboni (CO_2), el metà (CH_4), l'òxid nitrós (N_2O), els hidrofluorcarburs (HFC), els perfluorocarbons (PFC) i el hexà fluorur de sofre (SF_6). Per a tots els sectors, incloent l'aviació internacional i excloses les emissions o absorcions per l'ús de la terra, hi ha l'objectiu de reduir-los un 20% per a l'any 2020.

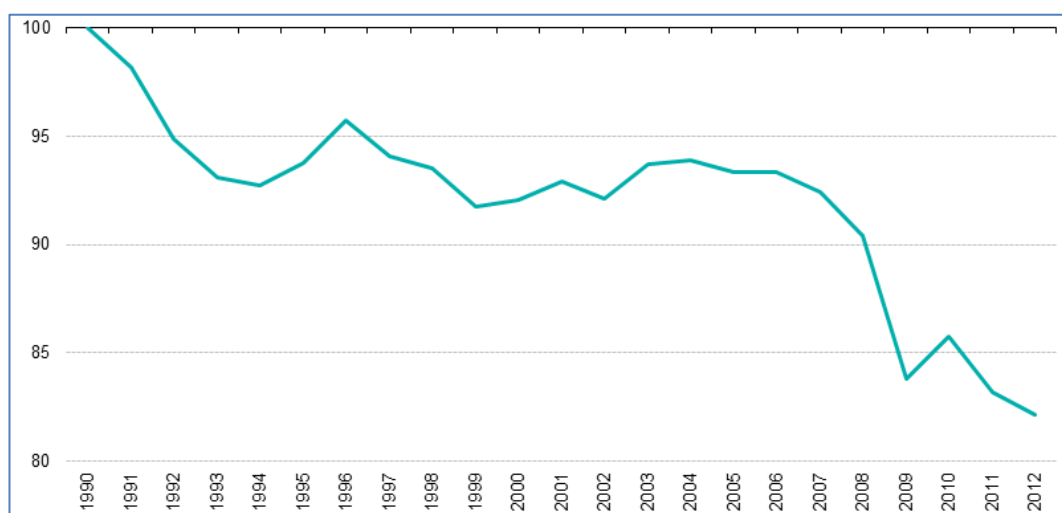
Si ens fixem en la repercussió que té el transport en la emissió d'aquests gasos, en la [Imatge 2.7](#), podem veure com representava el 21,9% del total l'any 2012, per darrera de la producció d'energia amb un 57,9%.



Imatge 2.7 Emissions de gas d'efecte hivernacle per sector, EU-28, 1999 i 2012 [9]

Si bé a la Unió Europea es veu una tendència clara en la reducció d'aquests gasos d'efecte hivernacle en els últims anys, com es pot observar en la següent imatge, globalment no és així. Si ens fixem des del període que va de la convenció de Kyoto, en el any 1997, a la de Copenhage en el 2007, les emissions van pujar a totes les zones del planeta. Amb un increment del 64% a Àsia-Oceania, un 59% al Pròxim Orient, un 26% a Amèrica Central i del Sud, un 25% a l'Àfrica, un 17% a Euràsia, un 9% a Amèrica del Nord i un 5% a Europa.

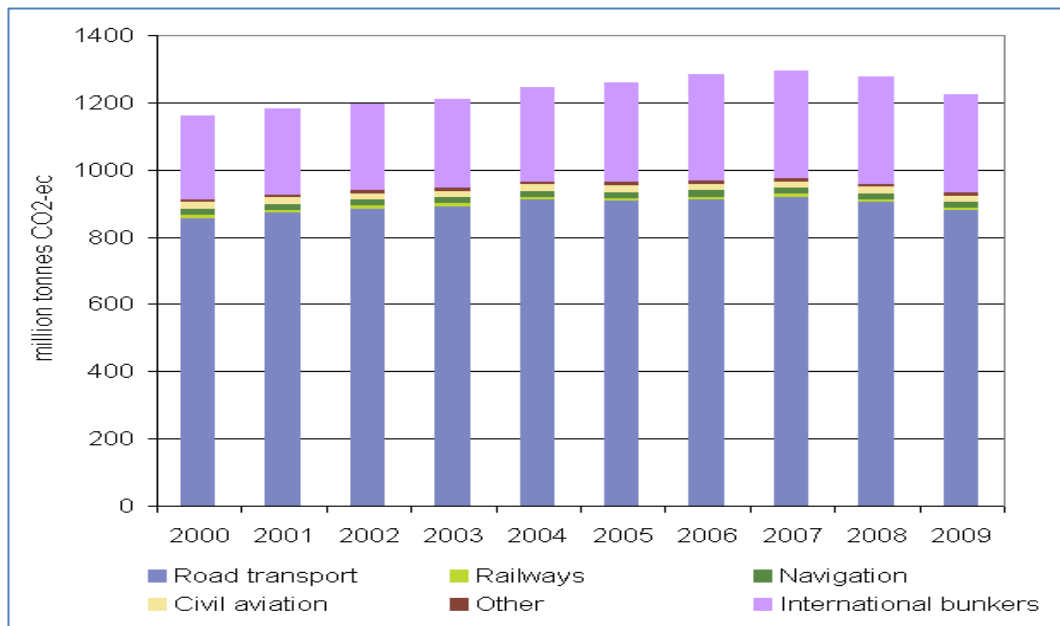
[10]



Imatge 2.8 Tendència en l'emissió de gasos d'efecte hivernacle, EU-28, 1990–2012 [9]

Si ens centrem en el mode de transport, el transport per carretera és el qui emet clarament més gasos d'efecte hivernacle, com es pot observar en la imatge

següent, seguit del transport de mercaderies internacional utilitzant embarcacions.



Imatge 2.9 Emissions d'efecte hivernacle del transport, 2000-2009 [11]

En aquests moments els objectius de l'ONU respecte el problema del canvi climàtic, provocat per les emissions d'efecte hivernacle, es centren en no permetre que la temperatura global del planeta superi un increment de 2°C respecte l'era preindustrial, per tal que els efectes no siguin irreversibles.

No obstant això, hi ha experts i organitzacions que consideren aquestes mesures del tot insuficients i creuen que amb increments inferiors a 2°C hi haurà ja zones on l'efecte serà irreversible.

Les dades de l'any 2014 de la NASA situaven aquest increment en 0.75°C, com es pot observar en la figura següent.

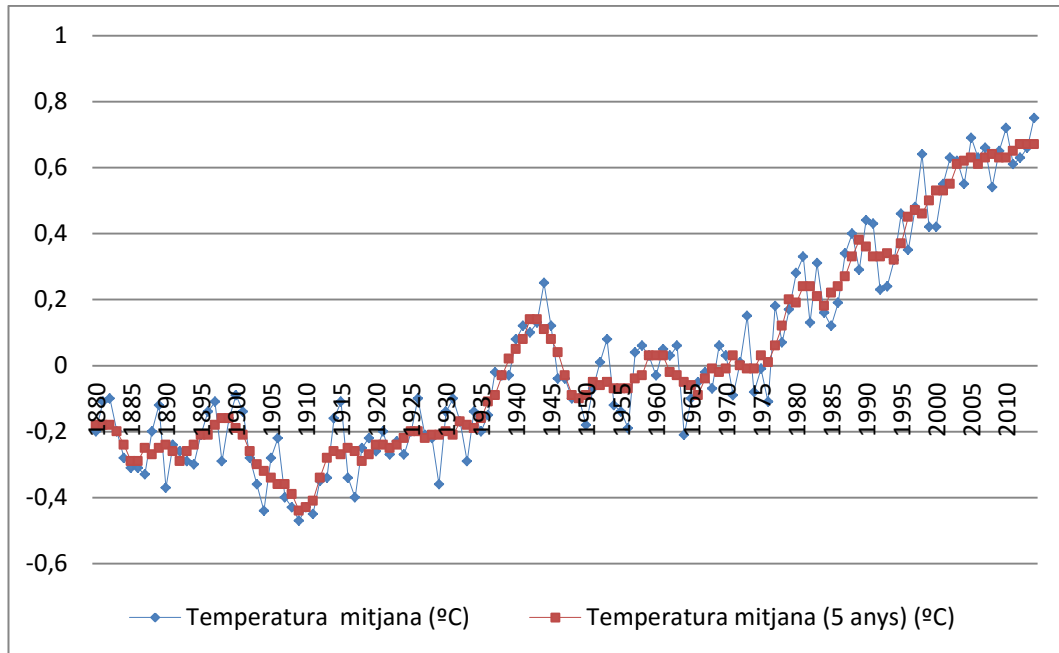


Figura 2.2 Increment de temperatura mitjana del planeta respecte l'era preindustrial [12]

Per aconseguir aquesta fita és necessari no superar el que s'anomena el pressupost de carboni. El pressupost de carboni és la quantitat de carboni màxim que pot emetre el planeta per tal d'evitar els impactes més greus del canvi climàtic i aquest valor és de 1 trilió de tones de carboni (1000 PgC).

L'any 2011 ja s'havia consumit el 52% d'aquest pressupost, amb una acumulació de 515 PgC des de la revolució industrial i si es segueix el ritme actual d'emissions es preveu que per l'any 2045 es superi.

El Grup Intergovernamental d'Experts sobre el Canvi Climàtic (IPCC) és l'organisme internacional de les Nacions Unides encarregat de l'estudi del canvi climàtic i planteja diferents escenaris pels propers anys en funció dels nivells de carboni emesos.

A continuació, es pot veure una taula resum d'aquests escenaris previstos, els increments de temperatura previstos en cada cas i l'any previst en que el pressupost de carboni estarà tot gastat.

Escenari	Condicionants	Increment temperatura	Any de la fi del pressupost de carboni
Camí amb emissions baixes	Pic d'emissions de diòxid de carboni el 2020 i una reducció del 66% respecte el valor del 2010 per l'any 2050	Fins 2°C	No superat
Camí amb emissions mitjanes	Pic d'emissions de diòxid de carboni el 2040 i un augment del 19% respecte el valor del 2010 per l'any 2050	Fins 2,9°C	2056
Camí amb emissions altes	Pic d'emissions de diòxid de carboni el 2080 i un augment del 34% respecte el valor del 2010 per l'any 2050	Fins 3,7°C	2057

Taula 2.1 Escenaris de canvi climàtic previstos per l'IPCC pels propers anys [13]

2.3 Fonts d'energia del vehicle híbrid elèctric

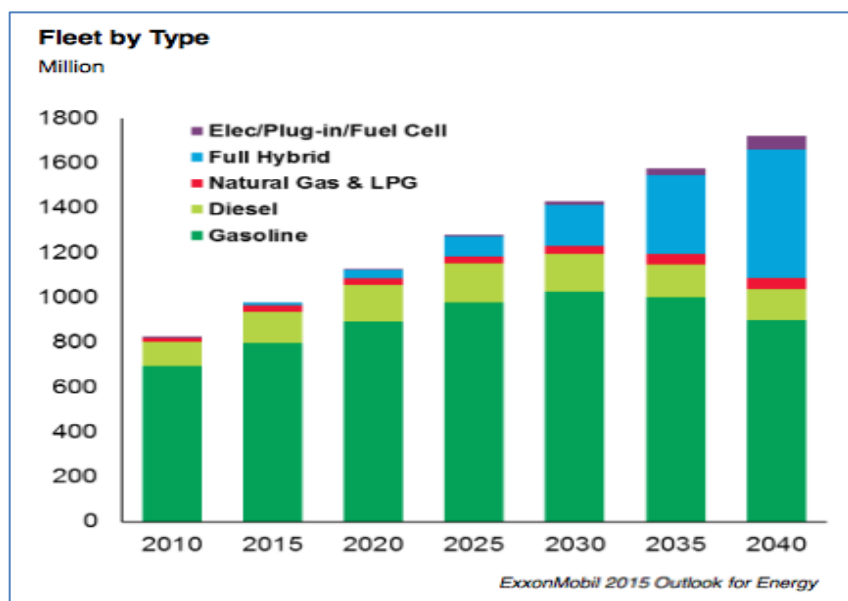
Al llarg de la història s'han utilitzat diferents tipus de fonts d'energia per tal que els vehicles poguessin desenvolupar el seu treball correctament en funció de la tecnologia disponible en cada moment. Des dels combustibles fòssils, com la fusta o el carbó, al gas natural, als derivats del petroli, l'energia humana o animal, l'energia elèctrica, l'hidrogen i les piles de combustible, l'energia solar, l'energia eòlica o la acumulació d'energia hidràulica, entre d'altres.

Podem dividir les fonts d'energia per a l'ús en el transport en tres categories: l'energia renovable, l'energia no renovable basada en combustibles fòssils i l'energia nuclear. L'energia renovable inclou l'energia hidràulica, la solar, la eòlica, la oceànica, la geotèrmica i la biomassa. L'energia no renovable d'origen fòssil inclou el carbó, el petroli i el gas natural. L'energia nuclear, tot i ser abundant, no es considera renovable i degut als requeriments de seguretat i a la dificultat per tractar els residus obtinguts en el procés, no s'utilitza en vehicles de transport comercials.

El model de transport de persones i de mercaderies que existeix actualment no es pot considerar sostenible, ja que el 97 % de l'energia total requerida per cobrir les necessitats mundials de transport s'obté de combustibles fòssils, els quals són recursos naturals no renovables. [14]

Actualment i pels propers anys, les fonts d'energia predominants per als cotxes continuaran sent els models tradicionals, utilitzant ja sigui dièsel o gasolina, però amb una certa disminució. El gas natural comptarà amb un cert augment, els elèctrics purs, també comptaran amb un cert augment i els diferents models híbrids que existeixen actualment, tindran un augment considerable, des dels models híbrids tradicionals de combustible líquid més bateria elèctrica als models *plug-in* o als de cèl·lula de combustible. [15]

Seguidament es mostra una imatge on es pot veure la previsió de vendes de vehicles en funció de la font d'energia utilitzada.



Imatge 2.10 Evolució dels tipus de vehicles en funció de la font d'energia utilitzada [15]

En referència als vehicles híbrids elèctrics actuals, les fonts d'energia utilitzades són els derivats del petroli per al model *full hybrid* i l'energia elèctrica de la xarxa elèctrica més els derivats del petroli per al model *plug-in*.

En la figura següent, es mostra un resum del model energètic actual utilitzat en el transport de persones i mercaderies i es destaca el sistema utilitzat en el model híbrid elèctric.

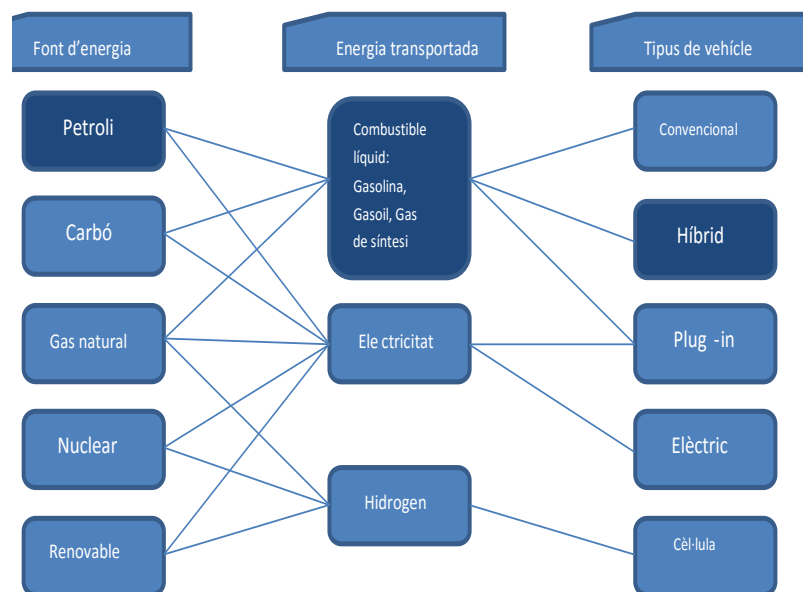


Figura 2.3 Model energètic utilitzat en el transport

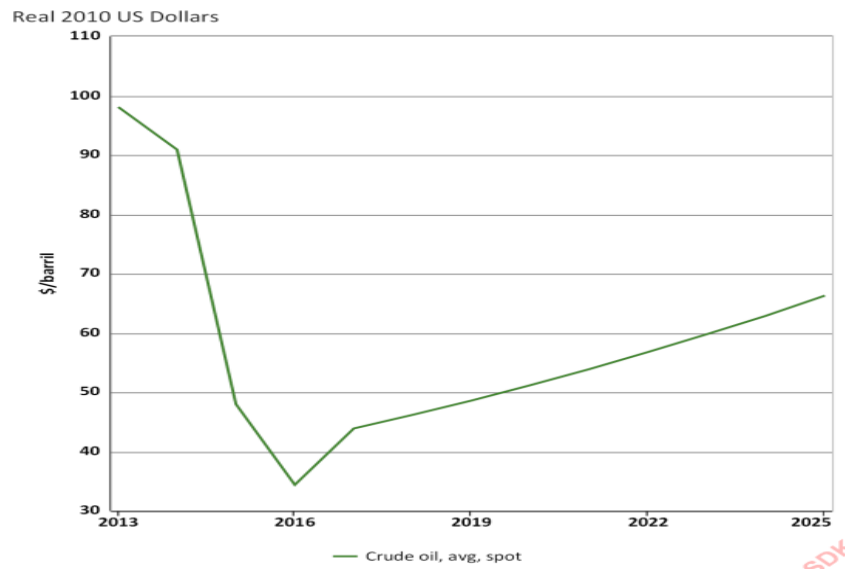
Pel que fa als derivats del petroli com a font d'energia cal esmentar la importància del concepte de pic petrolier. El pic petrolier, és un esdeveniment basat en la teoria de Hubbert i és el punt en el temps on la màxima extracció de petroli és realitzada, després del qual la producció inicia un decreixement terminal.

Aquesta situació pronostica un impacte econòmic negatiu globalment, degut a la dependència econòmica actual al petroli com a font d'energia en els sistemes de transport, agrícoles i industrials i un increment del preu del petroli.

Les previsions més optimistes estimen que el decreixement de la producció començarà després de l'any 2020, assumint fortes inversions en fonts alternatives avanç, per tal mantenir l'estil de vida dels països amb alts nivells de consum de petroli. En canvi, les previsions més negatives asseguren que el pic ja s'hauria produït durant l'any 2008 amb una quantitat de producció situada al voltant dels 85 milions de barrils per dia. [16]

Recentment, s'ha vist una reducció global en el preu del petroli. No obstant, les causes principals d'aquesta reducció han sigut principalment la reducció de l'economia globalment i l'augment de la producció de petroli per part de les principals empreses productores, per tal de provocar un excés en l'oferta i aconseguir d'aquesta manera fer inviable la utilització de noves tècniques en l'extracció de petroli com el cracking.

La realitat però és que el petroli és un combustible no renovable i com a tal, si bé la disponibilitat de les reserves es pot allargar molt en el temps, a la llarga, serà més costós extreure'l i com a conseqüència el preu del petroli tendirà a pujar en els propers anys, com es pot observar en la següent imatge.



Imatge 2.11 Previsió del preu del barril de petroli [17]

Si ens centrem ara en l'energia elèctrica dels cotxes híbrids elèctrics endollables provinent de la xarxa elèctrica pública, un factor important a tenir en compte és la manera com aquesta energia és aconseguida, ja sigui en referència a l'eficiència del sistema de producció i distribució com a la font primària utilitzada.

Com es pot veure en la [Figura 2.4](#) següent, les fonts d'energia més utilitzades a Europa EU-28 per produir energia elèctrica continuen sent l'energia nuclear i els combustibles fòssils, amb una estabilització en la seva producció i per tant, es consumeix pràcticament la mateixa quantitat d'energia que als anys noranta provinent d'aquestes fonts d'energia no renovables.

Per tant, tot i que els *HEVs* són més eficients i consumeixen menys combustible que els vehicles convencionals, actualment tant si es basen en la tecnologia *plug-in* com no, l'energia primària utilitzada continua sent majoritàriament d'origen no renovable.

No obstant aquesta dada, es veu també un augment considerable de la utilització d'energies renovables en la producció d'energia elèctrica en els últims anys.

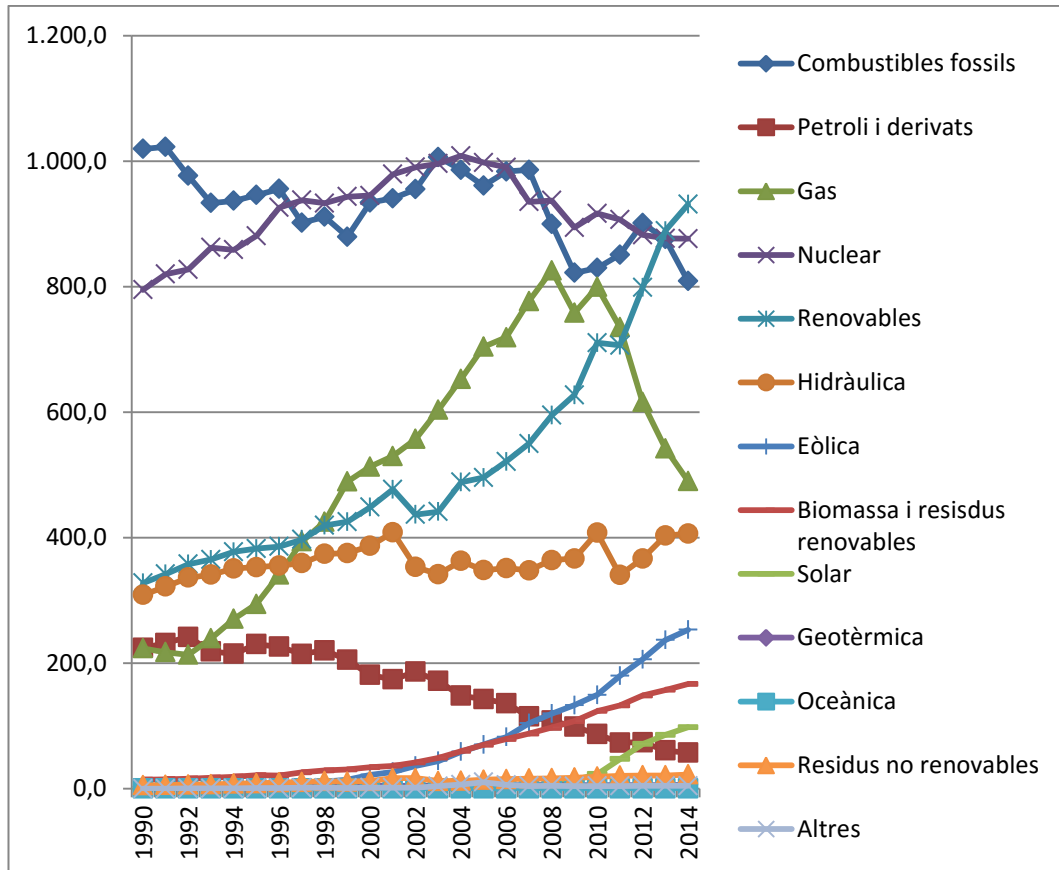


Figura 2.4 Evolució de les fonts d'energia utilitzades per a la producció d'energia elèctrica a EU-28 [18]

Per tant, la configuració de les fonts d'energia primàries utilitzades en la producció d'energia elèctrica és determinant a l'hora de considerar als vehicles elèctrics i als vehicles híbrids elèctrics endollables, vehicles veritablement respectuosos amb el medi ambient, ja que en funció del sistema utilitzat per obtenir aquesta energia es podran considerar sostenibles o no.

Els incentius fiscals i les polítiques mediambientals dels pròxims anys en la Unió Europea jugaran un paper clau en la transformació de la xarxa elèctrica europea i en la seva eficiència i sostenibilitat mediambiental.

En el any 2012, les pèrdues energètiques de distribució en la xarxa elèctrica europea eren de 274,06 bilions de KW/h. [19]

Un altre punt important respecte a l'energia elèctrica de la xarxa pública és que l'oferta i la demanda d'energia no sempre coincideixen, ja que la producció depèn en molts casos de la meteorologia, pel que fa a les energies renovables i de la dificultat de regulació de l'energia nuclear.

Aquest desequilibri entre l'oferta i la demanda evidencia un dels grans problemes tecnològics actuals de l'energia elèctrica, que és la dificultat del seu emmagatzematge.

Els vehicles elèctrics i híbrids endollables poden ajudar a equilibrar aquesta balança, convertint-se en un gran reservori d'energia elèctrica emmagatzemada i adaptant les seves recàrregues en els moments de màxima oferta d'electricitat, per tal d'aprofitar al màxim les condicions atmosfèriques del moment amb la producció de la màxima energia renovable possible.

Caldrà esforços importants en coordinació, en previsions meteorològiques i de demanda d'energia elèctrica mitjançant eines informàtiques, en xarxes elèctriques intel·ligents i en noves liberalitzacions del mercat elèctric per tal de millorar la sostenibilitat i l'eficiència de la xarxa elèctrica europea.

3 Tipus de vehicles híbrids elèctrics

Els vehicles híbrids elèctrics *HEVs* són cotxes que combinen sistemes de tracció elèctrica amb motors de combustió interna *ICE*. Estan constituïts per dos o més sistemes d'emmagatzematge d'energia, on s'acumula en ells energia elèctrica o combustible líquid. A través del sistema de control del vehicle es governen els diferents elements que formen part del sistema energètic del vehicle, intentant establir la millor combinació d'aquests elements per tal d'aconseguir una tracció el més eficient possible en tot moment, en funció de les condicions en que es troba el vehicle en cada instant.

En la figura següent es pot veure esquemàticament les diferències entre els vehicles elèctrics *EVs*, els híbrids elèctrics *HEVs* i els convencionals *CVs*.

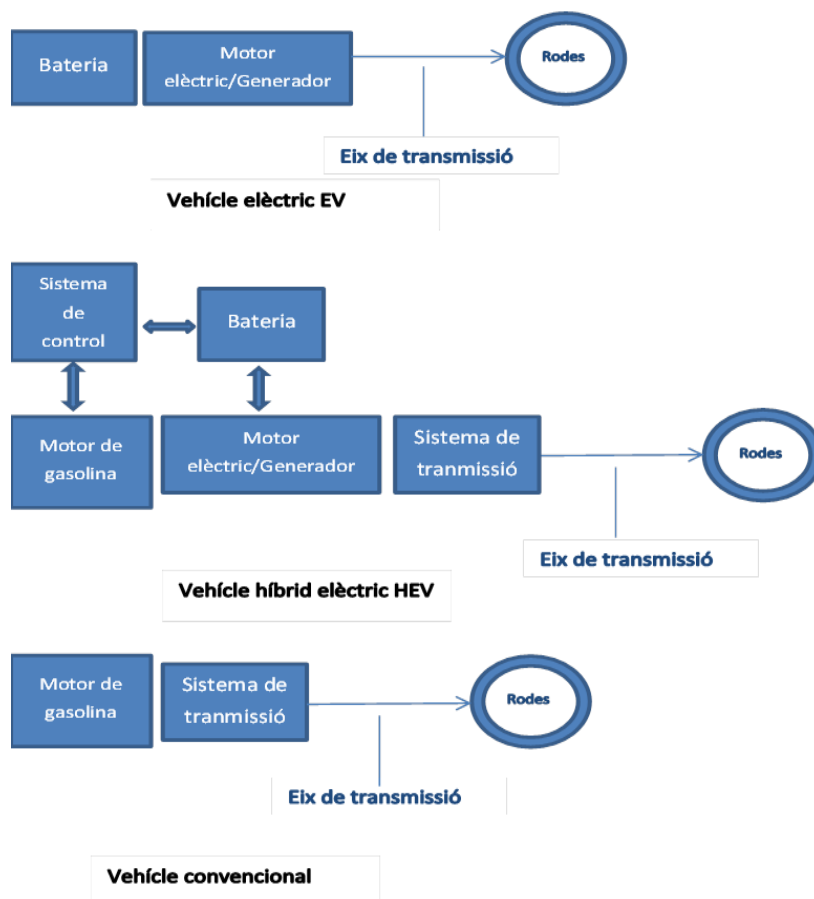


Figura 3.1 Diferències en la configuració dels components entre el EV, HEV i CV

A continuació es mostren els avantatges principals dels vehicles híbrids elèctrics en front dels vehicles convencionals.

- Incorporen tecnologia per millorar l'eficiència energètica del vehicle, com el sistema de frenada regenerativa, el qual no està disponible en els cotxes convencionals.
- Utilitzen el motor de combustió d'una manera més eficient i redueixen l'ús del ralenti resultant en un important estalvi de combustible.
- Proporcionen una millor conducció degut a les característiques pròpies del motor elèctric, el qual s'adapta millor a les forces de resistència de la carretera.
- Proporciona una reducció de les emissions de gasos d'efecte hivernacle.
- Redueix el consum de combustible d'origen fòssil.
- Incorporen motors de combustió de mida més petita, els quals són més eficients generalment que els motors de major mida.

Pel que fa als vehicles elèctrics *EVs* si els comparem amb els vehicles convencionals de gasolina o els dièsel, tenen els avantatges de no emetre emissions contaminants, una alta eficiència energètica i la capacitat d'obtenir la seva energia de múltiples fonts d'energia renovable.

No obstant això, amb la tecnologia actual tenen alguns desavantatges, els quals es presenten a continuació.

- Rang limitat de conducció degut a la baixa capacitat d'emmagatzematge d'energia que disposen les bateries elèctriques actualment.
- Una càrrega útil i una capacitat de volum per als ocupants i el seu equipatge limitats, degut a unes bateries pesades y voluminoses.
- Un temps llarg de recàrrega de les bateries elèctriques.
- Pocs punts de recàrrega en la via pública, comparat amb els que hi ha pels vehicles convencionals.

Per altra banda, en els últims anys el motor d'hidrogen s'ha convertit en una de les alternatives més prometedores per als nous vehicles no contaminants.

Una pila o cèl·lula de combustible és un generador que es basa en processos químics per a produir energia elèctrica al combinar hidrogen i oxigen. Alguns dels avantatges principals d'aquesta tecnologia són els següents; [20]

- L'hidrogen posseeix més potència en relació energia / pes que qualsevol altre combustible.
- A diferència del motor convencional, la pila de combustible és silenciosa i eficient.
- A diferència de la bateria elèctrica, la pila de combustible mai es descarrega si es disposa de combustible al dipòsit d'hidrogen.
- Produeix poca o cap contaminació, ja que tan sols allibera vapor d'aigua en la seva combustió.
- L'hidrogen és un recurs natural molt abundant en el planeta.

Tot i això, aquesta tecnologia presenta uns certs desavantatges respecte els cotxes híbrids elèctrics.

- L'hidrogen és molt inflamable al ser alliberat, suposant un risc elevat en cas d'accident de trànsit.
- Els sistemes d'emmagatzematge actuals estan poc desenvolupats i són cars.
- Actualment, el 96 % de l'hidrogen s'obté dels combustibles fòssils.
- El procés d'obtenció de l'hidrogen és complex i ineficient i la infraestructura necessària és cara.

A continuació es mostra una classificació dels *HEVs* en funció de la configuració que incorporen en el seu tren de tracció. Aquestes configuracions poden ser en sèrie, paral·lel, sèrie-paral·lel, hibridació parcial o suau i *plug-in*.

3.1 Vehicle híbrid elèctric amb configuració del tren de potència en sèrie

El vehicle híbrid elèctric amb configuració en sèrie és una evolució del vehicle elèctric. L'objectiu inicial d'aquest disseny és aconseguir uns rangs de conducció més extensos, incorporant un sistema motor convencional / alternador per recarregar les bateries del vehicle.

El vehicle es propulsat pel motor elèctric i aquest motor obté l'energia de la bateria i/o del sistema generador / motor convencional. La potència provinent d'aquestes dos fonts d'energia es fusiona mitjançant el dispositiu d'acoblament elèctric i l'electrònica de control del vehicle.

En la [Figura 3.2](#) següent es pot veure la configuració típica d'un tren de tracció del vehicle híbrid amb sèrie.

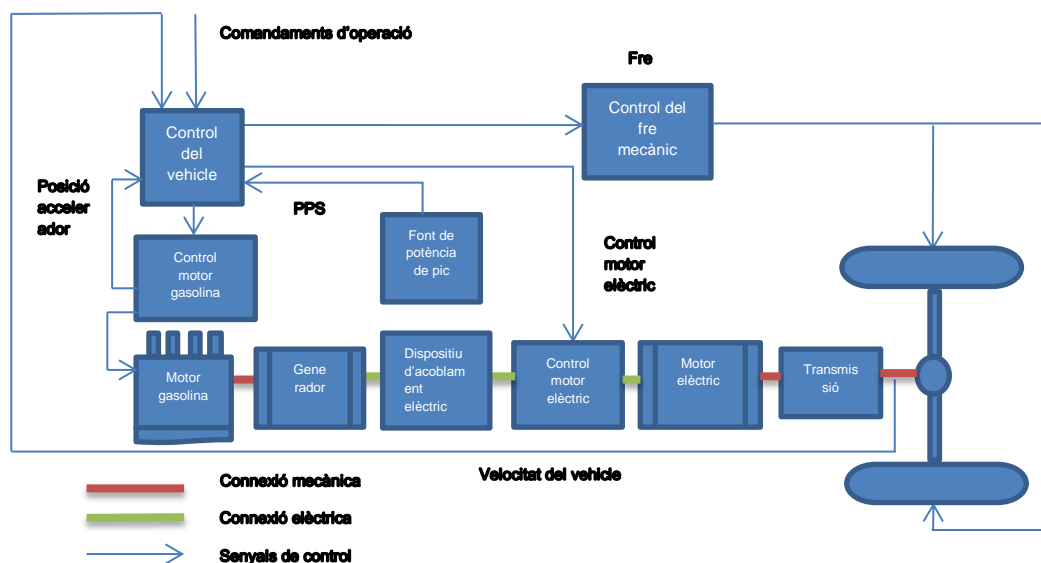


Figura 3.2 Vehicle híbrid elèctric amb configuració en sèrie

Pel que fa al bloc de font de potència de pic mostrat en la figura anterior, tant pot ser una bateria elèctrica, com un volant d'inèrcia, com un ultra condensador o una combinació i la seva funció principal és subministrar potència addicional en moments de demanda de pic.

El sistema generador / motor convencional està desacoblat mecànicament de les rodes y la seva velocitat y parell són independents de la velocitat del vehicle. El

motor convencional funciona sempre en la regió d'operació òptima, on el consum de combustible i les seves emissions són les mínimes.

En funció de l'estat del vehicle i les instruccions del conductor, el vehicle funciona en un dels següents modes de funcionament.

1. Mode de tracció híbrida. Es produeix quan la demanda de potència és elevada i tant el sistema generador / motor convencional com la font de potència de pic (PPS) subministren energia al motor elèctric.
2. Mode de tracció on la font de potència de pic funciona sola. Només la bateria o la font de potència de pic instal·lada proporciona l'energia demanada.
3. Mode de tracció unitat generador / motor convencional funcionant sola. Tota l'energia necessària es subministrada pel generador, alimentat pel motor convencional.
4. Font d'energia de pic recarregant-se des de la unitat generador / motor convencional. Quan la font d'energia de pic s'esgota i arriba a un cert límit inferior, el sistema generador / motor convencional recarrega la font d'energia de nou. En aquest mode l'energia del sistema es divideix amb la que s'usa per recarregar la font i la que s'utilitza per propulsar el vehicle. Si la demanda d'energia és superior a la màxima energia que pot proporcionar el generador aquest mode no s'activa.
5. Mode de frenada regenerativa. Quan el vehicle frena, aquesta energia es utilitzada pel motor elèctric en mode de generador per recarregar la font d'energia de pic.

Pel que fa al bloc de control, el seus objectius són proporcionar la potència demanada pel conductor, operar cada sistema amb la màxima eficiència, recuperar la màxima energia possible de frenada i mantenir l'estat de càrrega de la bateria SOC en els límits establerts.

Per aconseguir aquests objectius s'utilitza una estratègia de control determinada. Aquesta estratègia governa cada sistema, en funció de les variables d'entrada del bloc de control, mitjançant una retroalimentació d'informació proporcionada per una sèrie de sensors instal·lats en el vehicle i les instruccions del conductor.

Aquesta estratègia de control és clau per tal d'aconseguir la màxima eficiència possible durant l'operació del vehicle. Dos de les estratègies més utilitzades en

aquests tipus de vehicles són l'estratègia de control de màxim SOC i l'estratègia de control per termòstat o de motor convencional *on-off*.

La primera estratègia busca a la vegada proporcionar la potència suficient requerida pel conductor i mantenir el SOC de la font d'energia de pic al seu nivell màxim. El sistema generador / motor convencional és la font de potència primària mentre que la font d'energia de pic és la secundària.

Es considera una bona estratègia per a vehicles on el rendiment (velocitat, acceleració, etc.) sigui el principal objectiu. Mantenir un SOC a nivells alts constantment garanteix un rendiment alt en tot moment, sobretot en fases d'aturada / acceleració freqüents. [21]

A continuació, en la figura següent es mostra esquemàticament l'estratègia considerada.

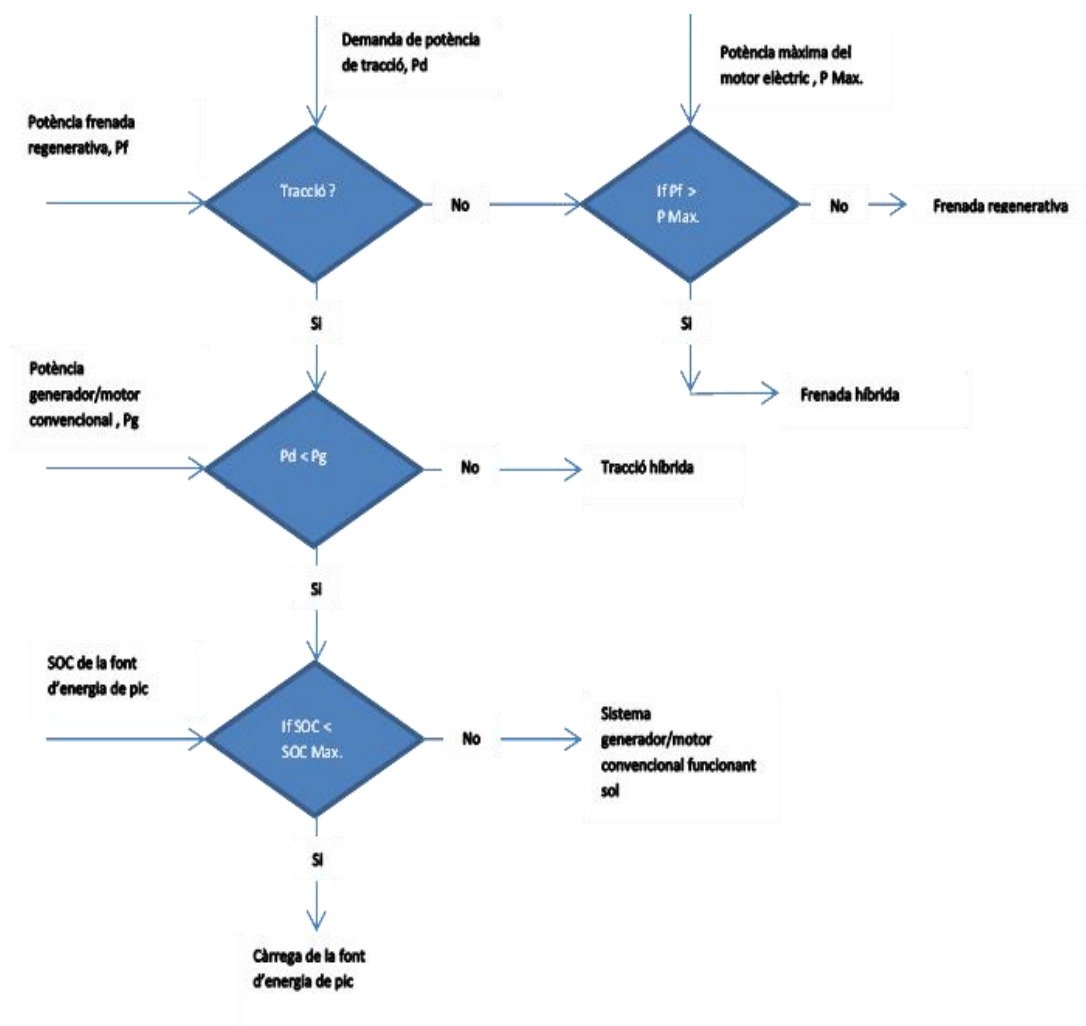


Figura 3.3 Estratègia de control per a mantenir uns nivells alts de SOC

En algunes ocasions, quan es condueix durant temps llargs i la velocitat és constant, com per exemple en autopista, la font d'energia de pic es manté carregada i el sistema generador / motor convencional treballa a règims de funcionament no òptims degut a que la potència requerida és inferior a la potència de treball òptima.

Per tal de millorar l'eficiència global entra en joc l'estratègia de control per termòstat o de motor convencional *on-off*, funcionant de la següent manera.

Quan el SOC de la bateria arriba a un nivell superior definit, el motor convencional s'atura i el vehicle només és propulsat per la bateria. Per altra banda, quan el SOC arriba a un cert límit inferior el motor convencional s'encén i la bateria comença a recarregar-se de nou, permetent el funcionament del motor convencional amb una millor eficiència.

3.2 Vehicle híbrid elèctric amb configuració del tren de potència en paral·lel

A diferència dels vehicles híbrids amb configuració en sèrie, el vehicle amb configuració en paral·lel permet tant al motor elèctric com al motor convencional transmetre la potència a les rodes del vehicle, amb l'opció de proporcionar els dos a la vegada l'energia requerida a les rodes o tant sols utilitzant un dels dos motors.

Per aconseguir el funcionament en paral·lel s'utilitza un acoblament mecànic que pot ser de dos maneres, acoblament per parell o acoblament per velocitat.

L'acoblament per parell mecànic és més apropiat quan s'utilitza el motor de gasolina com a font de potència primària, ja que aquest és principalment un sistema que proporciona parell.

Els avantatges del tren de tracció amb configuració en paral·lel respecte a la configuració en sèrie són els següents:

- No necessitat d'incorporar un generador al vehicle.
- Pot incorporar un motor elèctric més petit.

- Només una part de l'energia del motor de gasolina es transforma en energia elèctrica, reduint les pèrdues per conversió.

Tot i que l'eficiència general és superior que l'obtinguda amb la configuració en sèrie, s'ha de tenir en compte que la paral·lela és una configuració més complexa, que requerirà uns sistemes de control més sofisticats y per tant, amb un major cost econòmic.

El la figura següent es mostra un esquema de la configuració típica en paral·lel d'un vehicle híbrid elèctric.

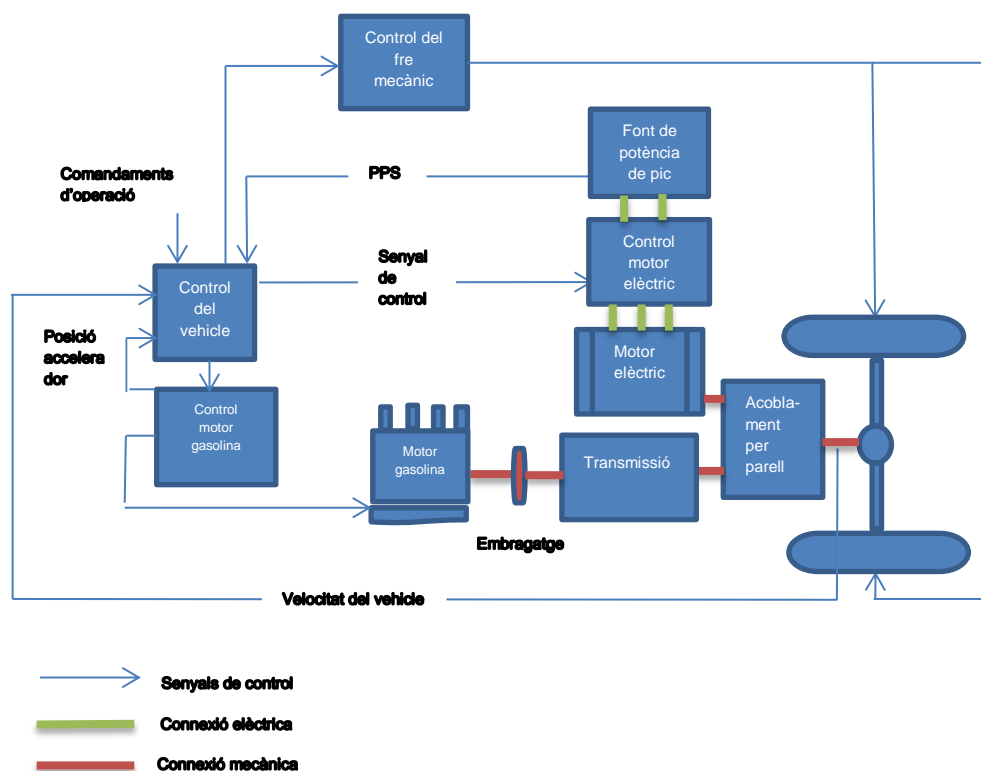


Figura 3.4 Vehicle híbrid elèctric amb configuració en paral·lel

El vehicle amb configuració en paral·lel pot funcionar utilitzant aquests diferents modes de funcionament:

1. Mode de propulsió amb motor elèctric sol. Quan la velocitat del vehicle és inferior a un cert valor preestablert i hi ha nivells de SOC suficients en la bateria, el motor elèctric s'encarrega sol de propulsar el vehicle. Per davall d'aquesta velocitat mínima el motor de gasolina no funciona eficientment, proporcionant valors alts de consum de combustible i emissions contaminants. Per tant, el

motor de gasolina s'atura o funciona amb ralentí amb l'embragatge d'acoblament obert.

2. Mode de propulsió híbrida. Quan la demanda de potència del conductor és superior a la potència que el motor de gasolina pot proporcionar, els dos motors entreguen la potència a les rodes del vehicle al mateix temps. En aquest mode s'intenta que el motor de gasolina funcioni en la zona d'operació òptima encarregant al motor elèctric el subministrament de la potència que falta per satisfer la demanda.

3. Mode de recàrrega de la bateria. Quan la potència demanada pel conductor és inferior a la que pot proporcionar el motor de gasolina de manera òptima i la bateria està descarregada, el motor elèctric es posa a funcionar com a generador, recarregant la bateria de nou.

4. Mode de propulsió amb motor de gasolina sol. Quan la potència requerida pel conductor és inferior a la que pot proporcionar el motor de gasolina funcionant en el rang d'operació òptim, la bateria està plena i la velocitat és superior a un cert valor, el vehicle és propulsat tant sols pel motor de gasolina. En aquest mode el sistema elèctric és desconnectat per a que no es produeixin pèrdues.

5. Mode de frenada regenerativa. Quan es vol frenar el vehicle i la potència de frenada requerida és inferior a la potència màxima de frenada regenerativa que el motor elèctric pot proporcionar, el motor elèctric es posa a funcionar com a generador per tal d'igualar la potència de frenada requerida. En aquest cas el motor de gasolina es desacoblat.

6. Mode de frenada híbrida. Quan la potència de frenada requerida és superior a la potència màxima de frenada que pot proporcionar el sistema elèctric, el fre mecànic és aplicat. El sistema de frenada regenerativa funciona proporcionant la seva potència màxima i la resta es afegida pel fre convencional.

Igualment que en la configuració en sèrie, l'estratègia de control per termòstat pot ser utilitzada. Quan la bateria esta plena, la velocitat és alta i la potència requerida és inferior a la proporcionada pel motor de gasolina d'una forma eficient el sistema s'activa per tal d'aturar el motor de gasolina i posa en funcionament el elèctric.

Quant el SOC arriba al seu límit inferior el motor de gasolina es posa de nou en funcionament fins que recarrega al màxim la bateria, utilitzant la estratègia anteriorment comentada de mantenir el SOC de la bateria a nivells sempre alts.

L'inconvenient d'aquest sistema és que es produeix una transmissió d'energia freqüent entre el motor de gasolina i la bateria causant pèrdues per conversió. Per tant és convenient trobar l'equilibri òptim entre l'estratègia de control per termòstat i l'estratègia de manteniment de SOC màxim.

A continuació es pot observar esquemàticament l'estratègia utilitzada amb la configuració en paral·lel per al cotxe híbrid elèctric.

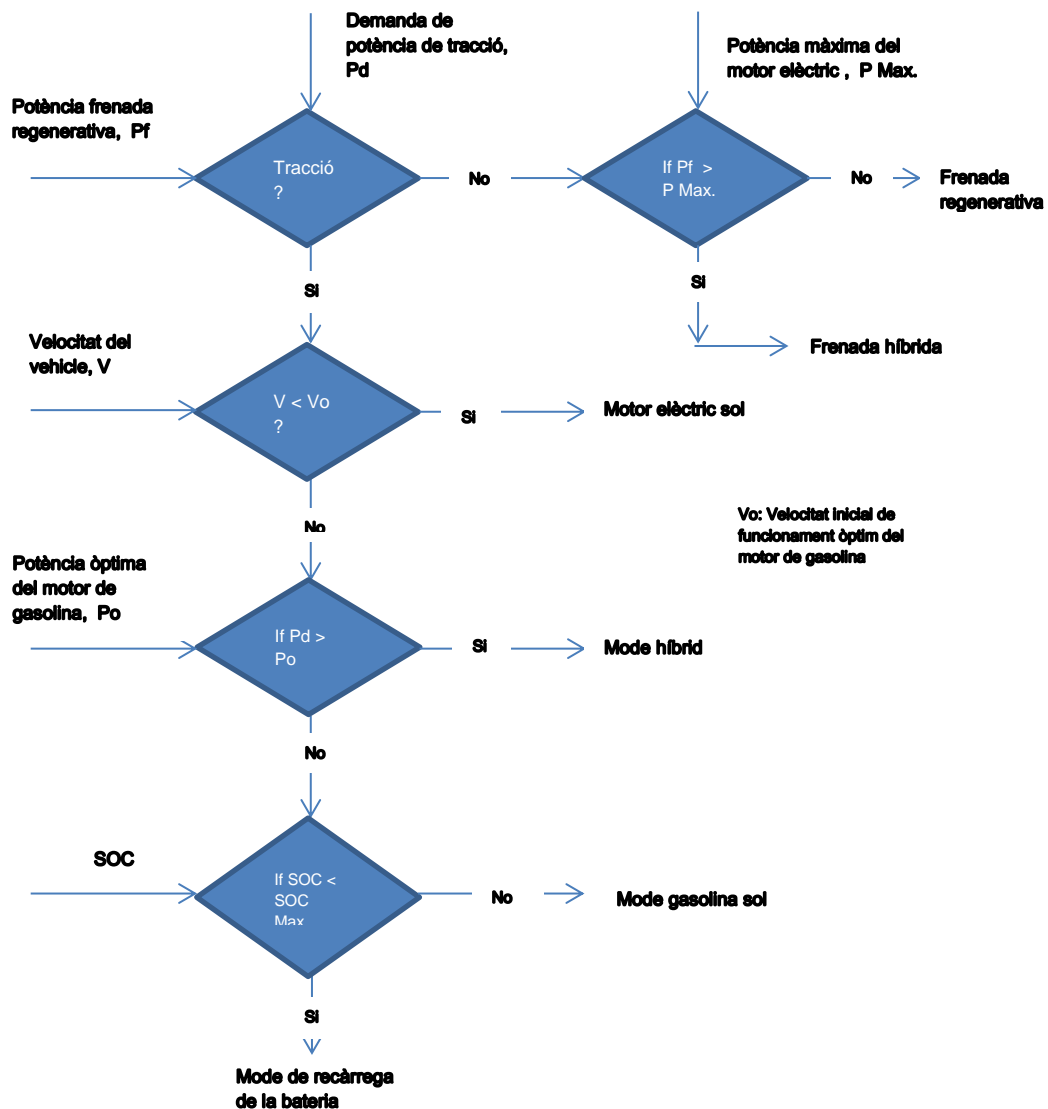


Figura 3.5 Estratègia de control utilitzada per la configuració en paral·lel

3.3 Vehicle híbrid elèctric amb configuració del tren de potència en sèrie-paral·lel

Coneguts també amb el nom de híbrids de potència dividida, són una combinació de les configuracions anteriors, sèrie i paral·lel i agafen les millors característiques de les dos, aconseguint d'aquesta manera una major eficiència general. No obstant això, el cost del vehicle és superior a les altres configuracions degut a la seva complexitat de control i al fet de que incorporen més components en el sistema de tracció.

El motor de gasolina és alliberat de la velocitat / parell de les rodes, per tant, igual que en els vehicles en sèrie, el motor pot funcionar sempre en la seva regió més òptima.

A més a més, una part de l'energia del motor de gasolina es transmet directament a les rodes sense necessitat de conversió energètica, tal com solen fer en gran mesura els vehicles amb configuració en paral·lel.

Per aconseguir aquesta configuració s'utilitzen engranatges planetaris que permeten un acoblament per velocitat dels dos motors o equips d'engranatges, corretges o cadenes que acoblen els dos motors per parell mecànic.

3.4 Concepte d'híbridació i vehicle amb híbridació parcial

Aquesta configuració es basa amb un tipus de vehicle amb configuració en paral·lel, no obstant, aquest vehicle no es capaç de funcionar utilitzant únicament el motor elèctric degut al les baixes potències que pot proporcionar aquest motor.

Essencialment és un vehicle convencional al qual s'ha incorporat un petit motor elèctric al darrera del motor de gasolina. D'aquesta manera pot funcionar com a motor d'arrencada del motor de gasolina, també com a generador, recarregant la bateria o pot proporcionar una part de la potència directament a les rodes quan un pic de demanda es produeix en el cicle de conducció.

Se'ls coneix amb el nom d'híbridació parcial o lleugera per diferencials dels cotxes híbrids d'híbridació total. El grau d'híbridació d'un vehicle H es calcula de la següent manera; [22]

$$H = \frac{\sum_{i=1}^n P_{me_i}}{\sum_{i=1}^n P_{me_i} + P_{mg}} \cdot 100 \quad \text{Eq. 3.1}$$

on P_{me} és la potència del motor elèctric i P_{mg} la potència del motor de gasolina. Cal notar que poden haver més d'un motor elèctric / generador en el sistema.

Quant el valor de H és 0% es tracta d'un cotxe de gasolina convencional, quant el valor és del 100%, és un cotxe elèctric pur. Els cotxes híbrids en configuració en sèrie se situen al voltant del 50%, els *plug-in* o endollables al voltant del 75% i els d'hibridació parcial al voltant del 25%. Els de configuració en paral·lel tenen hibridació mixta i poden prendre diferents valors entre el 25% i el 75%. [22]

Els híbrids totals són més eficients que els parcials, no obstant, suposen una forta inversió econòmica en el sistema de tracció del vehicle. A més a més, els híbrids parcials fan servir motors elèctrics i bateries de mides més reduïdes, reduint així el pes total del vehicle i permetent una major capacitat de volum i de càrrega útil.

És una solució intermèdia entre eficiència i cost, que busca facilitar les conversions dels vehicles convencionals i més contaminants en vehicles híbrids més sostenibles.

3.5 Vehicle híbrid elèctric endollable

En els vehicles comentats anteriorment el consum d'energia de la font d'energia de pic o bateria es pot considerar zero, ja que l'energia en l'inici d'un cicle de conducció és pràcticament la mateixa que l'acumulada al final del cicle.

Tota l'energia necessària per moure el vehicle es proporciona pel motor de gasolina, el motor dièsel o la cèl·lula de combustible i es extreta del tanc de combustible on s'emmagatzema en forma líquida. Aquest tanc de combustible es recarrega de nou quan està buit, sent el punt d'entrada d'energia procedent de l'exterior del sistema vehicle.

La font d'energia secundària o de pic actua com un ressort, on la seva energia va fluctuant entre un cert rang preestablert en el disseny del vehicle.

Amb la millora de la tecnologia utilitzada en les bateries en els últims anys, s'ha millorat la capacitat d'emmagatzematge de les bateries i s'ha reduït el preu de fabricació. Com a resultat han aparegut en el mercat els vehicles endollables o

plug-in, situant-se entre els híbrids elèctrics convencionals i els vehicles elèctrics purs.

L'objectiu dels *plug-in* o endollables és desplaçar el motor de combustió com a font d'energia primària a font d'energia secundària, mitjançant un ús major del motor elèctric.

Per aconseguir uns majors rangs de conducció utilitzant tant sols el sistema elèctric, és necessari una aportació d'energia elèctrica addicional de l'exterior, mitjançant l'entrada d'energia al cotxe a través d'un endoll que es connecta a la xarxa elèctrica.

Els diferents modes de funcionament i una sèrie de terminologia específica respecte aquesta tipologia de vehicles és definida a continuació;

1. Mode d'empobriment *CD*. El SOC de la bateria pot fluctuar però el valor mig decreix mentre el vehicle es mou.
2. Mode de sosteniment *CS*. El SOC de la bateria pot fluctuar però el seu valor mig es manté constant a un cert nivell.
3. Rang tot elèctric *AER*. Si la bateria està plena el vehicle funciona tant sols mitjançant el motor elèctric fins que el motor de gasolina s'engega per primer cop.
4. Quilometres amb vehicle elèctric *EVKM*. Són els quilometres realitzats amb el mode *AER*.
5. Rang de càrrega d'empobriment. Són els quilometres recorreguts fins que es posa en mode *CS*. Pot incorporar propulsió proporcionada pel motor de combustió però el SOC de la bateria decreix.
6. *PHExx*. Es l'energia acumulada equivalent que pot ser usada en un cert cicle de conducció. Per exemple, *PHEV30* pot desplaçar l'energia equivalent de petroli 30 milles fent servir l'energia obtinguda de la xarxa elèctrica.

L'estratègia d'aquest vehicle es basa en la utilització del mode *AER* el màxim possible, a diferència dels híbrids elèctrics d'hibridació menor on el motor elèctric tant sols és utilitzat puntualment. Alguns vehicles incorporen el canvi manual per part del conductor del mode *CS* al mode *EV*, vehicle elèctric.

Una altra estratègia utilitzada és la coneguda com l'estratègia de control barrejada, que fa servir a la vegada tant el motor elèctric com el de combustible. Funciona en mode *CD* fins que arriba a un cert límit inferior, després del qual operarà en mode *CS*. Estratègia similar a la utilitzada en els híbrids elèctrics convencionals.

Un aspecte important a tenir en compte per aquests vehicles és que no obstant són més eficients que els comentats anteriorment, degut a un ús més intensiu del motor elèctric, que siguin més respectuosos amb el medi ambient i que emetin menys emissions contaminats globalment que els anteriors, dependrà en gran mesura de la manera com s'ha obtingut l'energia elèctrica de la xarxa, ja que si s'ha obtingut fent servir recursos no renovables el impacte ambiental serà similar.

4 Simulador del vehicle híbrid elèctric

El simulador del vehicle híbrid elèctric s'ha realitzat mitjançant el programa informàtic Simulink®, mòdul integrat a MATLAB®.

Simulink® és un entorn de programació visual, per a modelat, simulació i anàlisi de sistemes dinàmics multi domini. La seva interfície gràfica es basa en una eina que permet la representació de diagrames de blocs juntament amb una biblioteca de blocs personalitzats, solvers per modelar i simular els sistemes dinàmics i generació de llenguatge C automàtic per implementacions en temps real. [23]

És una eina amb un alt grau d'abstracció de fenòmens físics i molt usada en control automàtic i processament de senyals digitals. També degut a la seva eficiència, flexibilitat i capacitat d'iteració ràpida s'utilitza en feines de disseny.

El simulador realitzat es basa en un vehicle elèctric híbrid amb configuració en paral·lel i s'ha buscat en tot moment la seva simplificació i flexibilitat per tal de poder realitzar simulacions de vehicles híbrids elèctrics amb diferents característiques i components.

Per aquesta versió del simulador no s'han tingut en compte forces de fregament intern, així com inèrcies i altres pèrdues parasitàries provocades per components auxiliars del vehicle. El càlcul de les forces de fregament intern són complexes d'obtenir i en la majoria dels casos s'utilitzen mètodes experimentals amb vehicles reals. A més a més poden variar molt d'un vehicle a un altre. [24]

El simulador consta d'una sèrie de blocs que representen el sistema vehicle. Cada bloc representa un subsistema en concret o component del vehicle, amb una sèrie de senyals d'entrada i de sortida que permetent la interacció amb la resta de blocs, simulant així el comportament del vehicle.

En la figura de continuació es pot observar tot el model de sistema vehicle amb els diferents subsistemes que en formen part.

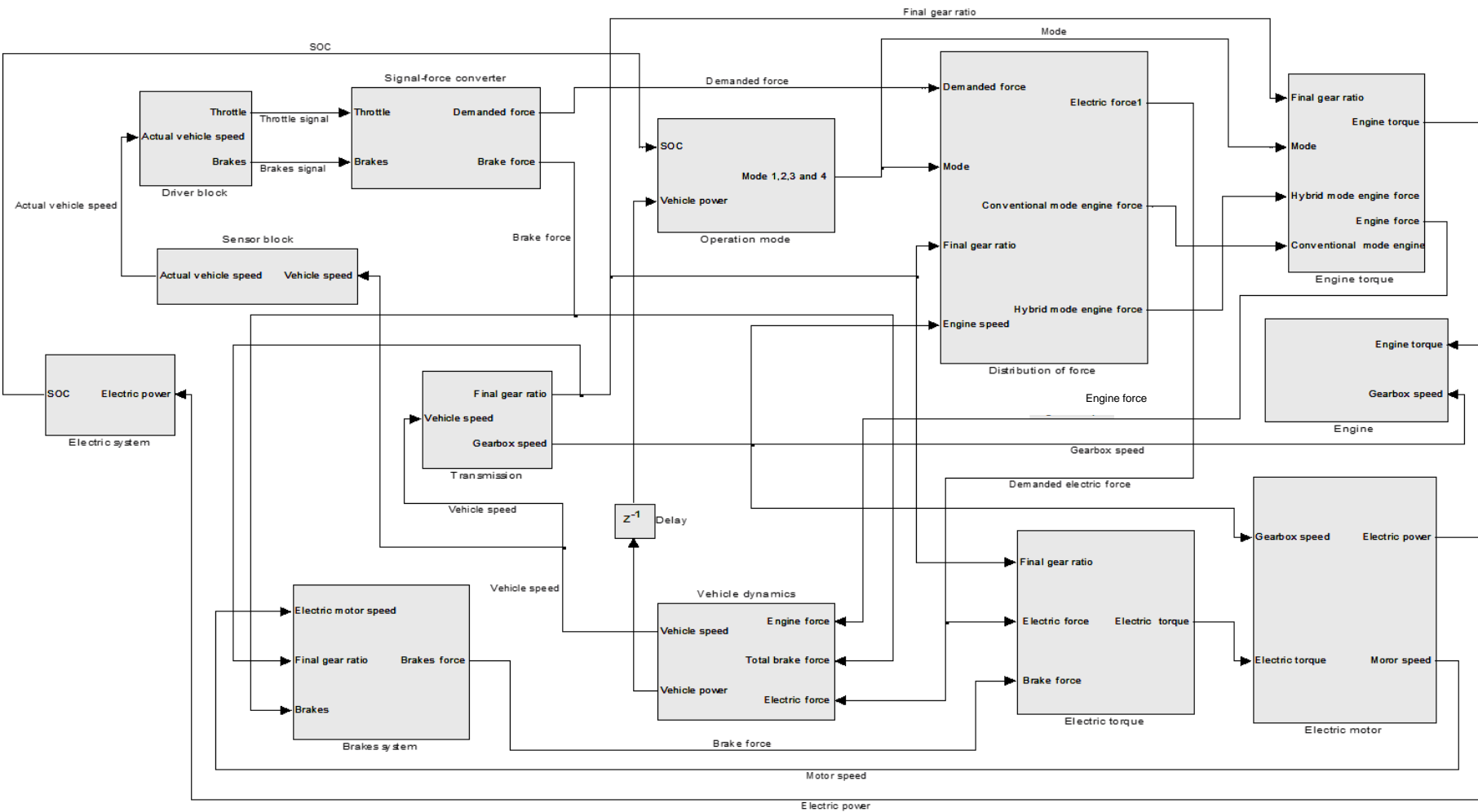


Figura 4.1 Simulador del vehicle híbrid elèctric

Com es pot veure en la figura anterior, el simulador està format pels subsistemes bloc conductor, el convertidor de senyal dels pedals a força requerida, el bloc mode d'operació, el bloc de distribució de força, el bloc de càlcul del parell del motor de combustió, el bloc del sensor de velocitat, el bloc del motor de combustió, la bateria del vehicle, la transmissió del vehicle, el sistema de frenada regenerativa, el bloc de dinàmica del vehicle, el càlcul del parell del motor elèctric, el motor elèctric i el bloc de retard.

El sistema funciona en llaç tancat. A partir de la senyal d'entrada al sistema o consigna, on s'indica la velocitat requerida pel conductor en funció del temps, els blocs van interactuant i simulant el comportament del vehicle híbrid elèctric fins que el sistema retorna la velocitat real del vehicle, la qual és comparada amb la desitjada.

Pel que fa al bloc de retard, la seva funció és retardar la senyal del llaç tancat per tal que en el moment de fer la simulació el programa informàtic no es col·lapsi.

A continuació es detalla la funció de cada subsistema, les seves característiques més importants així com les equacions utilitzades per la creació del model.

4.1 Bloc conductor (*Driver block*)

La funció d'aquest sistema és simular el comportament del conductor del vehicle. En aquest bloc l'usuari del simulador haurà d'introduir en forma de fitxer *.mat* i mitjançant el *workspace* de MATLAB®, la velocitat que desitgi que tingui el vehicle en funció del temps per cada simulació.

Per altra banda, aquesta velocitat és comparada amb la velocitat real del vehicle en tot moment, obtinguda a partir del sensor de velocitat del cotxe.

Un cop comparades les dos velocitats, un controlador PI ajustarà l'error del sistema proporcionant una senyal de resposta per aconseguir igualar les dos velocitats. En funció de si aquesta resposta és positiva o negativa, la senyal sortirà del bloc a través del *throttle*, simulant l'acció del conductor trepitjant el pedal de l'accelerador o a través del *brake*, simulant l'acció del conductor trepitjant el pedal del fre.

A continuació es presenten les equacions utilitzades en el subsistema;

$$u(s)_{PID} = (Driving\ cycle(s) \cdot k - Actual\ vehicle\ speed(s)) \cdot C_I(s) - Actual\ vehicle\ speed(s) \cdot C_P(s) \quad Eq. 4.1$$

$$if \quad 0 < u(s)_{PID} < 100; \quad Throttle = u(s)_{PID} \cdot H(s) \quad Eq. 4.2$$

$$if \quad -100 < u(s)_{PID} < 0; \quad Brakes = u(s)_{PID} \cdot H(s) \cdot (-1) \quad Eq. 4.3$$

on $u(s)_{PID}$ és la senyal de sortida del controlador, $C_I(s)$ és l'acció integral del controlador, $C_P(s)$ és l'acció proporcional del controlador i $H(s)$ la funció de transferència, que en el nostre cas actuarà com a filtre de soroll.

En la figura següent es pot veure l'esquema del sistema esmentat amb tots els blocs que el formen.

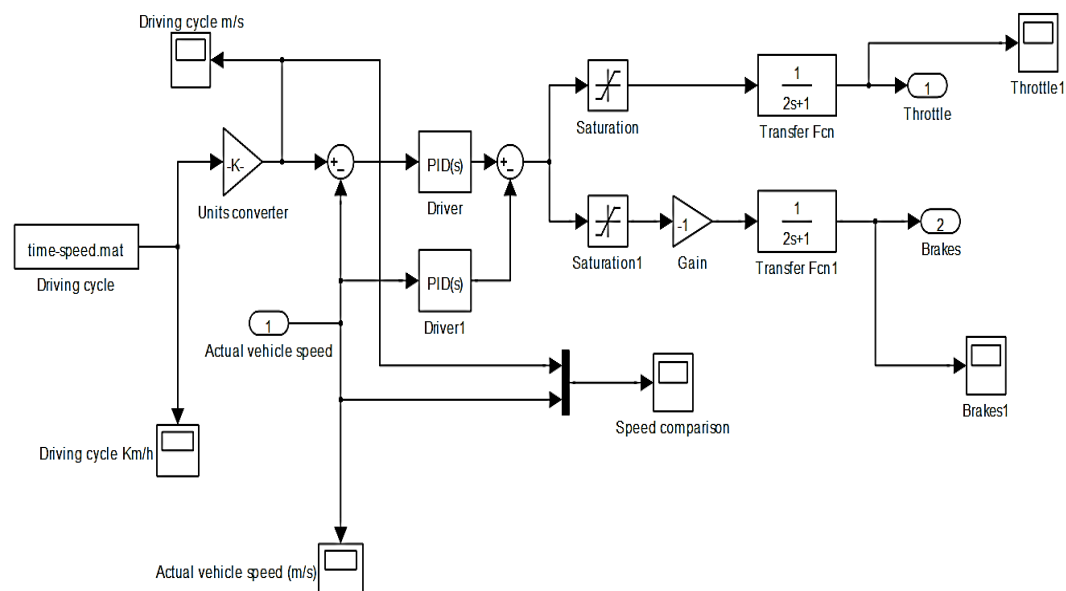


Figura 4.2 Sistema bloc conductor

La funció del bloc *units converter* és convertir les unitats de km/h a m/s mitjançant la constant $k = 3600/1000$.

En referència al bloc *driving cycle*, es pot obtenir més informació sobre els cicles de conducció en l'[Annex I](#) del present estudi.

Per a més informació sobre la sintonia dels paràmetres del controlador utilitzat en el bloc per a la reducció de l'error de velocitat del sistema enllaç tancat, es pot veure l'[Annex II](#) del present estudi.

La funció dels blocs de saturació és filtrar la senyal en funció de si aquesta és positiva o negativa. El bloc *saturation* permet senyals que vagin de 0 a 100. Respecte al bloc inferior *saturation1*, permet el traspàs de senyals que es trobin entre 0 i -100.

El bloc de guany amb valor -1 transforma la senyal negativa de la frenada per tal de poder treballar posteriorment amb valors positius en els següents blocs del sistema.

Respecte a les funcions de transferència amb expressió $\frac{1}{2s+1}$, corresponen al filtrat de les dues sortides del controlador PID i la seva funció és atenuar el soroll del sensor de velocitat del vehicle per tal de que l'acció de control sigui suau i no s'amplifiqui aquest soroll. Es filtra el senyal de tal manera que el soroll provinent del sensor del vehicle no es transmet als blocs posteriors del sistema.

Els diferents visors que apareixen en el sistema permeten que l'usuari conegui en tot moment el comportament de les diferents senyals del sistema, a través de la gràfica que mostra cada visor. Pot veure informació sobre l'acció del pedal de l'accelerador *Throttle1*, l'acció del pedal de fre *Brakes1*, la velocitat d'entrada al sistema *Driving cycle*, la velocitat real del vehicle *Actual vehicle speed* i la comparació entre les dos velocitats *Speed comparison*.

4.2 Convertidor senyal – força (*Signal-force converter*)

La funció d'aquest bloc és convertir les senyals provinents del bloc conductor en senyals físiques de força. Per aconseguir aquesta conversió el sistema utilitza dos constants, una per obtenir la força requerida per accelerar el vehicle *demanded force*, en cas que el conductor vulgui accelerar i l'altra per obtenir la força de frenada *brake force*, en cas que el conductor desitgi frenar.

Les equacions utilitzades en el subsistema són les següents;

$$Acceleration = Ms \cdot k / At \quad Eq. 4.4$$

$$Maximum acceleration force = M \cdot Acceleration \quad Eq. 4.5$$

on *Maximum acceleration force* és la força màxima que pot proporcionar el vehicle suposant una acceleració *Acceleration* provinent del pedal de

l'accelerador màxima, M_s és la màxima velocitat del vehicle i A_t és el temps que tarda el cotxe en assolir aquesta velocitat màxima.

Per altra banda tenim;

$$k_{acc.} = \text{Maximum acceleration force}/100 \quad \text{Eq. 4.6}$$

$$\text{Demanded force}(t) = \text{Trottle}(t) \cdot k_{acc.} \quad \text{Eq. 4.7}$$

on $k_{acc.}$ és la constant d'acceleració del pedal del accelerador i Demanded force és la força requerida pel conductor.

Les altres equacions del subsistema són;

$$\text{kinetic energy} = (M_s \cdot k)^2 \cdot 0,5 \cdot M \quad \text{Eq. 4.8}$$

$$\text{Maximum braking force} = \text{kinetic energy}/B_d \quad \text{Eq. 4.9}$$

on kinetic energy és l'energia cinètica del vehicle circulant a la màxima velocitat possible, que en el nostre cas és $\text{Maximum speed } M_s$. $\text{Maximum braking force}$ és la força de frenada màxima del vehicle i B_d és la distància de frenada.

Finalment tenim;

$$k_{brak.} = \text{Maximum braking force}/100 \quad \text{Eq. 4.10}$$

$$\text{Brake force}(t) = \text{Brakes}(t) \cdot k_{brak.} \quad \text{Eq. 4.11}$$

on $k_{brak.}$ és la constant de frenada i Brake force la força de frenada requerida pel conductor.

A continuació es mostra el subsistema i tots els blocs i senyals que en formen part per tal d'obtenir les esmentades forces.

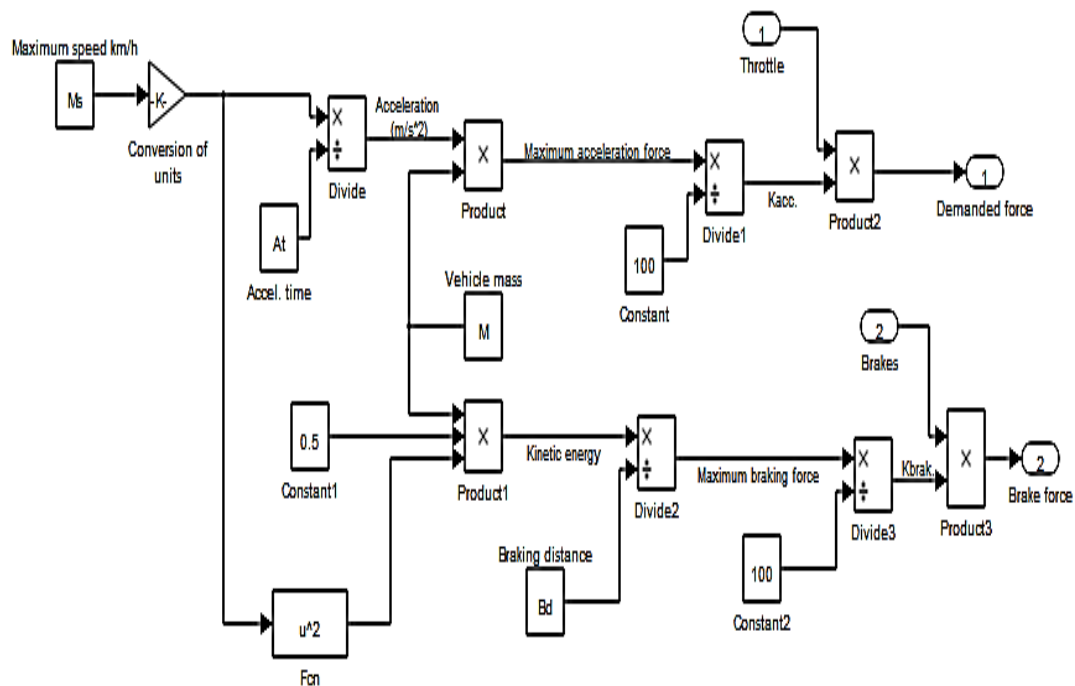


Figura 4.3 Convertidor senyal-força

L'usuari ha d'introduir a través del *workspace* de MATLAB® la massa M del vehicle i el temps que tarda el vehicle *Acc. time* en arribar a la seva velocitat màxima, suposant una acceleració també màxima.

El bloc *Conversion of units* transforma la màxima velocitat que pot aconseguir el vehicle *Maximum speed* de km/h a m/s.

A través de la constant 100 situada al bloc *constant*, s'obté una proporció de tal manera que si la senyal del pedal de l'accelerador és màxima s'obtindrà la màxima força que pot proporcionar el vehicle.

A partir de la velocitat màxima del vehicle i la seva massa s'obté la màxima energia cinètica del vehicle. Un cop obtinguda aquesta energia es divideix per la distància que recorrerà el vehicle en cas que se li apliqui un força màxima de frenada. Aquesta distància la introdueix l'usuari a través del *workspace* mitjançant la constant *braking distance* Bd .

Igual que pel cas anterior, mitjançant la constant de valor 100 s'obtindrà una proporció o constant de frenada k_{brak} . que multiplicada per la senyal provinent del pedal de fre del bloc conductor, resultarà amb la força requerida de frenada *brake force*.

4.3 Distribució de força (*Distribution of force*)

La funció d'aquest bloc és distribuir la força requerida pel conductor entre els dos motors del vehicle, el motor elèctric i el motor de combustió, en funció del mode de funcionament, per tal d'aconseguir un aprofitament màxim de les diferents característiques dels motors i d'aquesta manera utilitzar d'una forma òptima els dos sistemes de propulsió del vehicle.

Seguidament es mostra el sistema encarregat d'aquesta funció i els diferents subsistemes i blocs que el formen.

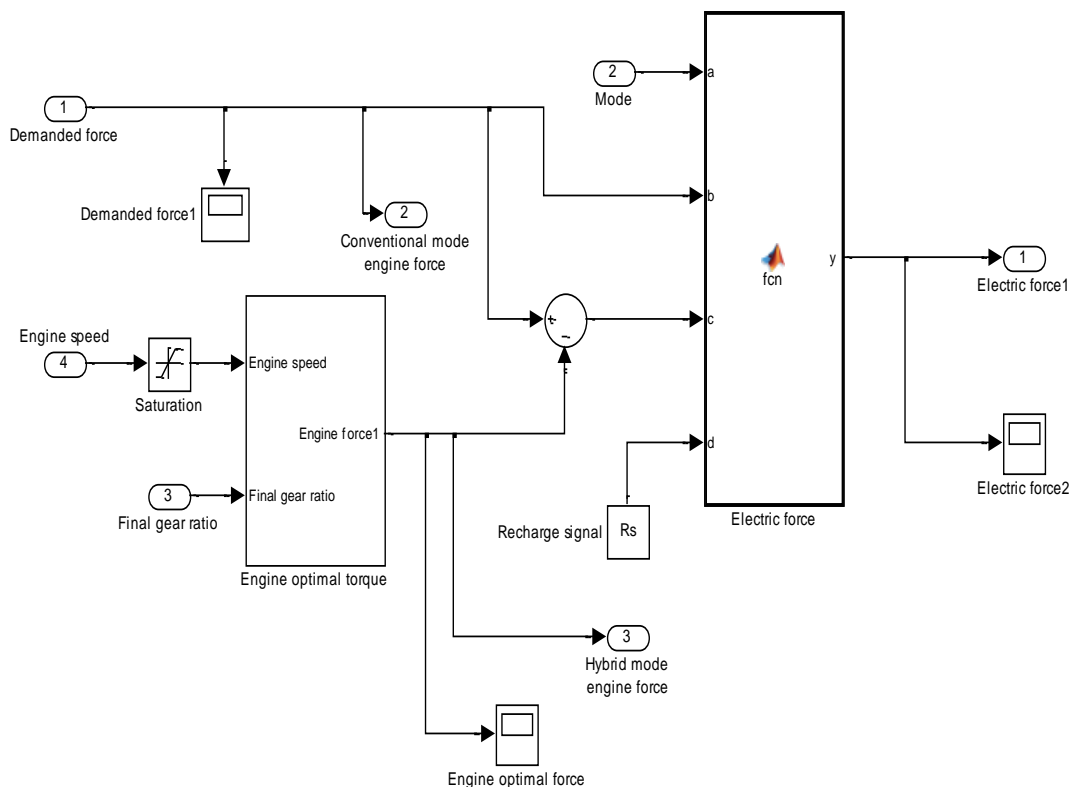


Figura 4.4 Distribució de força

Més endavant, en l'apartat [4.9. Mode d'operació](#), s'explica més detalladament el funcionament de cada mode d'operació del vehicle híbrid elèctric *Mode*.

Si el mode de funcionament és el mateix que el d'un vehicle convencional, tota la força requerida pel conductor ha de ser proporcionada únicament pel motor de combustió, quedant-nos la següent igualtat;

$$\text{Conventional mode engine force}(t) = \text{Demanded force}(t) \quad \text{Eq. 4.12}$$

Si en canvi el cotxe funciona en mode de funcionament híbrid, la força es reparteix entre el motor de combustió i el motor elèctric. En aquest mode, el motor de combustió proporcionarà una part de la força total, funcionant en tot moment de la manera més eficient possible i la resta de força serà proporcionada pel motor elèctric, quedant-nos la següent equació;

$$\text{Electric force}(t) = \text{Demanded force}(t) - \text{Engine force}(t) \quad \text{Eq.4.13}$$

Per tal d'aconseguir aquesta força òptima, que permet el funcionament del motor de combustió d'una forma eficient, s'utilitza el bloc *engine optimal torque*, proporcionant aquest últim el parell òptim en funció de la relació de transmissió final del vehicle i la velocitat del motor de combustió.

El bloc *saturation* limita la velocitat d'entrada entre un rang de funcionament òptim, el qual és el rang de velocitats on es troba la corba de màxima eficiència del motor de combustió. Aquest rang serà introduït per l'usuari en el simulador en funció de les característiques òptimes del motor.

A continuació es mostren els components que formen part del bloc *engine optimal torque*.

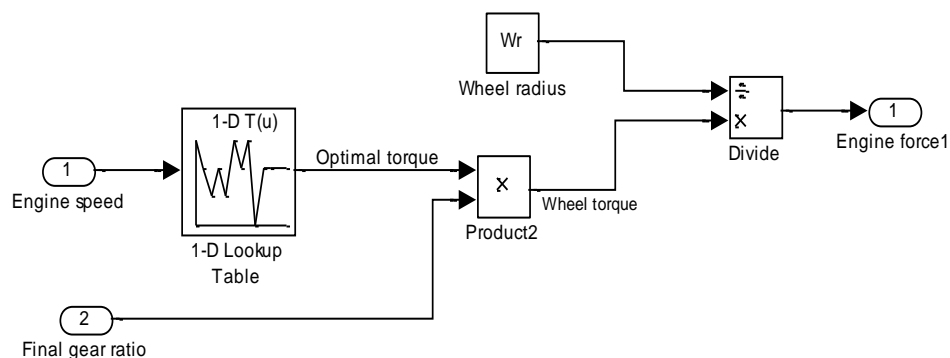


Figura 4.5 Parell òptim del motor de combustió

Les equacions utilitzades en aquest subsistema són les següents;

$$\text{Wheel torque}(t) = \text{Optimal torque}(t) \cdot \text{Final gear ratio}(t) \quad \text{Eq. 4.14}$$

$$\text{Engine force}(t) = \text{Wheel torque}(t)/Wr \quad \text{Eq. 4.15}$$

A partir de la velocitat d'entrada del motor de combustió i el bloc *lookup table* s'obté el parell òptim, que multiplicat per la relació de transmissió final *final gear ratio* i dividit pel radi de la roda *wheel radius* W_r s'aconsegueix la força que proporcionarà el motor de gasolina.

El radi de la roda serà introduït per l'usuari a través del *workspace* i la corba de màxima eficiència s'introduirà dins del bloc *lookup table*.

En els resultats d'aquest estudi es mostra un exemple pel que fa a les dades introduïdes en la taula per aconseguir el parell òptim en funció de la velocitat en l'eix motor.

La corba de màxima eficiència és la que conté els punts de màxima eficiència del motor per a qualsevol potència requerida. A través del diagrama de consum específic del motor, comentat més endavant en l'apartat [4.5. Sistema motor de combustió](#), es pot obtenir aquesta corba, buscant per a cada potència el punt on el consum específic és mínim.

Tornant a la [Figura 4.4](#) anterior, es pot observar el bloc *Recharge signal* R_s , el qual la seva funció és recarregar la bateria quan el vehicle funciona en el mode de funcionament de recàrrega. Aquest mode funciona quan el vehicle està engegat però té una velocitat zero. D'aquesta manera es poden aprofitar les aturades momentànies del vehicle per a recarregar de nou la bateria, com per exemple quan el conductor s'espera en un semàfor en vermell.

Aquesta constant R_s serà introduïda per l'usuari a través del *workspace* de MATLAB®.

Finalment, per obtenir la força que proporcionarà el motor elèctric, es mostra el codi del bloc *electric force*, on a partir del mode i la força requerida d'entrada s'aconsegueix la força elèctrica requerida.

```
function y = fcn(a,b,c,d)
%#codegen
if a==1
y = b;
elseif a==2
y = c;
elseif a==3
y = 0;
else
y = d;
end
```

Figura 4.6 Codi del bloc *electric force*

On la variable *a* és el mode de funcionament, poden aquesta prendre els valors 1,2,3 i 4 en funció del mode d'operació. La variable *y* és la variable de sortida del bloc i pot agafar els valors de les variables d'entrada *b*, *c* i *d*.

Si el mode és 1, mode de funcionament elèctric, la sortida *y* o la força elèctrica necessària, serà tota la força requerida pel conductor a través de la variable *b*, ja que el motor de combustió no funcionarà en aquest mode.

Si el mode és 2, mode de funcionament híbrid, la sortida *y* o la força elèctrica serà *c*, és a dir, la força total demanada pel conductor menys la força que proporcionarà el motor de combustió funcionant de manera òptima.

Si el mode és 3, mode de funcionament convencional o de combustió pura, la sortida serà 0, ja que el motor elèctric no funcionarà en aquest mode.

Finalment, si el mode és 4, mode de recàrrega elèctrica, la sortida serà la constant *Rs* comentada anteriorment a través de la variable d'entrada *d*.

4.4 Parell del motor de combustió (*Engine torque*)

La funció d'aquest bloc és calcular el parell en el motor de gasolina a partir del mode de funcionament. La senyal de sortida d'aquest bloc s'envia al subsistema motor de combustió per tal de poder calcular el consum de combustible del motor.

Les equacions utilitzades en aquest bloc són les següents;

$$Vehicle\ torque(t) = Wr \cdot Engine\ force(t) \quad Eq. 4.16$$

$$Engine\ torque(t) = Vehicle\ torque(t) \cdot Final\ gear\ ratio(t) \quad Eq. 4.17$$

En la figura següent es pot observar els blocs que el formen, juntament amb les senyals d'entrada i de sortida.

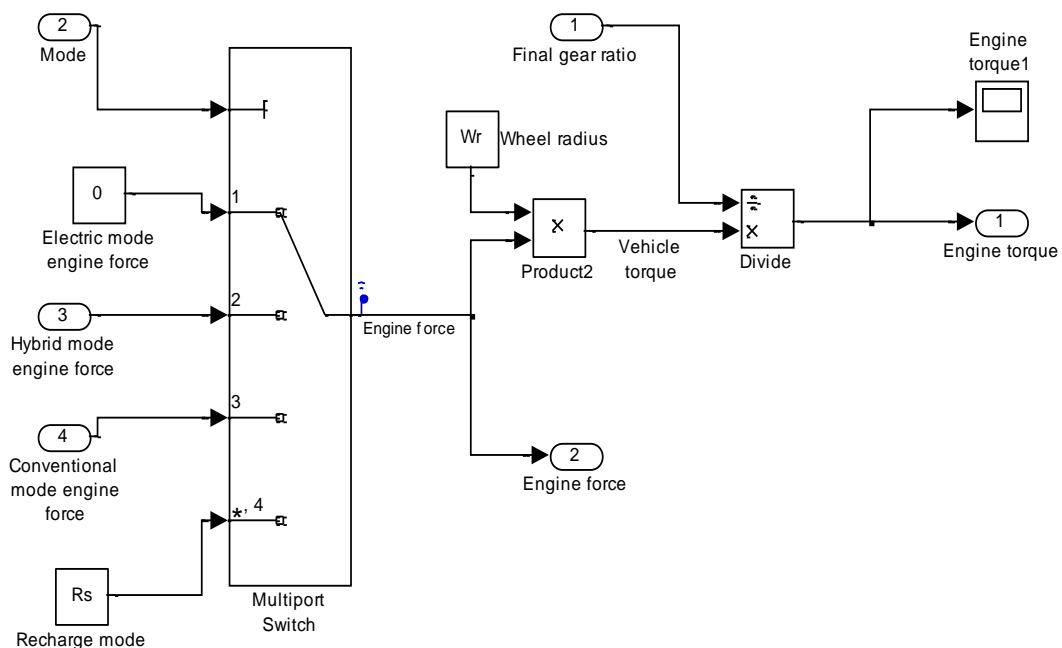


Figura 4.7 Sistema parell del motor de combustió

A partir de la senyal d'entrada *mode*, que indica al sistema en quin mode de funcionament es troba el vehicle, el bloc *multiport switch* canvia automàticament d'entrada per tal de proporcionar la sortida corresponent.

Quan el vehicle es troba en el mode 1, funcionament elèctric pur, el motor de combustió es desacobla de les rodes del vehicle i per tant, el parell transmès al motor de combustió es pot considerar de valor 0.

Si en canvi el mode de funcionament és el 2, mode híbrid, l'interruptor automàtic deixarà passar la senyal d'entrada *hybrid mode engine*, amb la corresponent força associada a ella.

Igualment, si el mode de funcionament és el 3, mode de combustió pura, l'interruptor es situarà en el número 3 del bloc, deixant passar tota la força requerida pel conductor.

Finalment, si el mode és el 4, el vehicle estarà funcionant amb una velocitat 0 m/s i la funció del motor de gasolina serà recarregar les bateries amb una força d'entrada R_s proporcionada per l'usuari del simulador, a partir del *workspace* del programa.

Un cop obtinguda la força requerida pel motor de combustió, aquesta força es multiplica pel radi de les rodes del vehicle W_r , variable introduïda per l'usuari a través del *workspace* i que dependrà de les característiques del vehicle estudiat.

El parell del vehicle obtingut es divideix per la relació de transmissió final del vehicle, calculada en un altre bloc del sistema vehicle, per aconseguir finalment el parell en l'eix del motor de gasolina.

4.5 Sistema motor de combustió (*Engine*)

La funció d'aquest sistema és modelitzar el comportament del motor de combustió d'un cotxe híbrid elèctric, per tal d'obtenir els consums de combustible del motor en funció de la potència que proporciona al vehicle.

Per aconseguir aquests consums s'utilitza un mapa de consum instantani, que l'usuari haurà d'introduir a través d'aquest bloc en el model creat amb Simulink®.

Aquests mapes proporcionen el consum instantani en g/s en funció de la velocitat angular i el parell en l'eix del motor.

A continuació es mostra un exemple d'aquests mapes de consum, en una gràfica en 3D realitzada amb el mateix programa MATLAB®, amb dades obtingudes del programa Advisor®. [25]

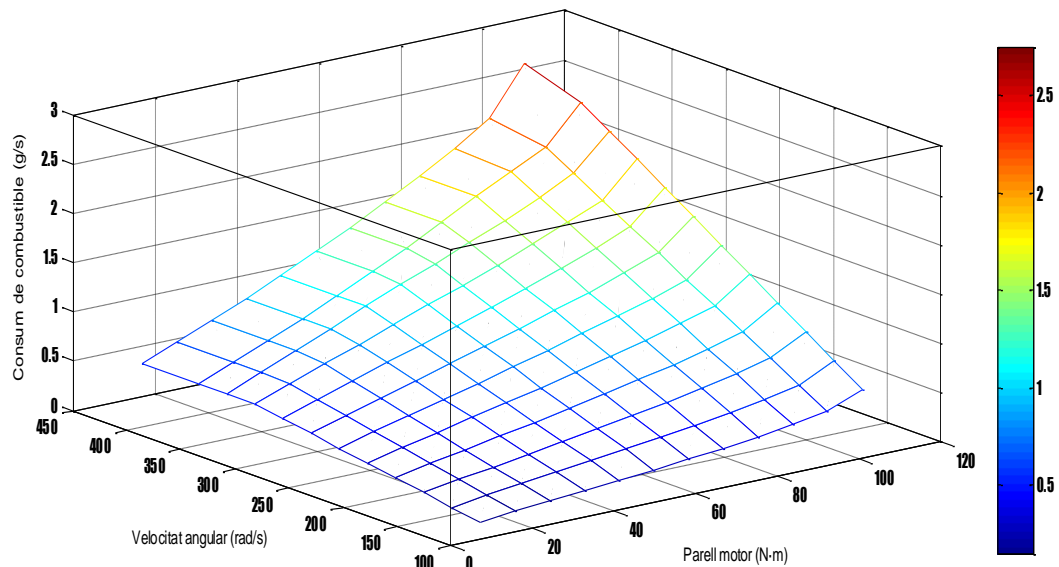


Figura 4.8 Exemple de mapa de consum instantani

En el sistema l'usuari podrà observar el consum específic a través del visor *specific fuel consumption* en g/KW·h.

El consum específic indica l'eficiència que té un motor a l'hora de transformar l'energia del combustible en energia mecànica i s'expressa com la quantitat de combustible que té que consumir (en grams), per obtenir una determinada potència (en KW), durant una hora.

A continuació podem veure un exemple d'un mapa de consum específic en 3D realitzat amb el mateix programa MATLAB®.

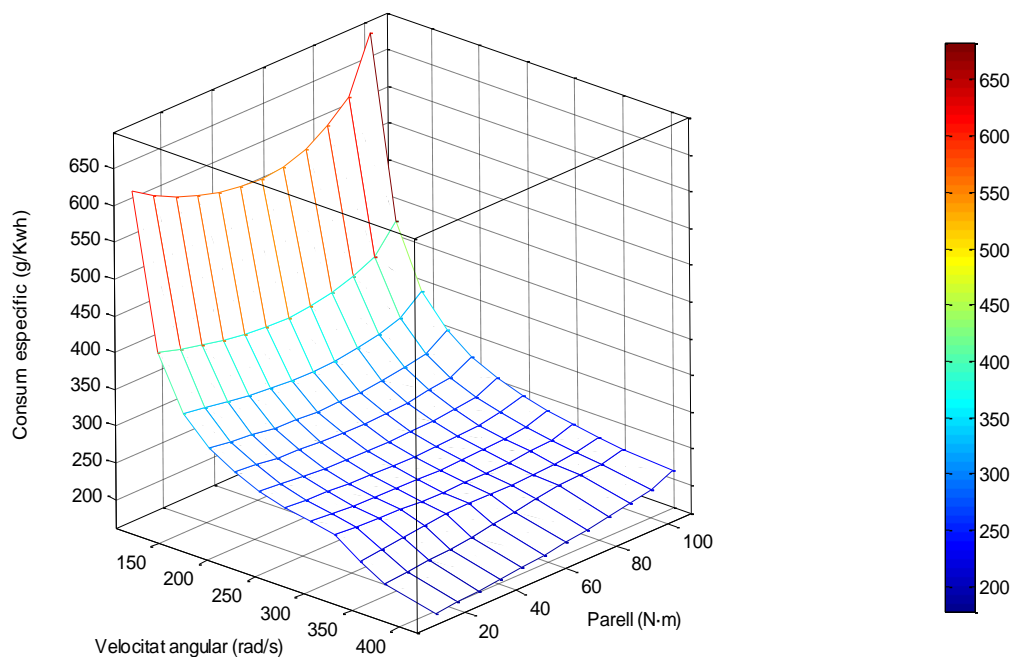


Figura 4.9 Exemple de mapa de consum específic [25]

Si s'observa la figura superior, es pot veure com el consum específic va augmentant a mesura que la velocitat angular és més baixa, es a dir, el motor de combustió presenta majors rendiments per a règims de velocitat alts.

Pel que fa al parell mecànic, el motor consumeix menys quan aquest és baix i la velocitat alta i a mesura que augmenta la velocitat s'obté millors rendiments per a parells intermedis.

El rendiment màxim d'un motor de combustió es situa tant sols en un punt de funcionament, el qual es coneix com pol econòmic. Per tant l'estratègia a seguir és intentar que el motor de combustió funcioni sempre al voltant d'aquest punt.

Més endavant, en l'apartat, [4.11. Mode d'operació](#), hi ha més informació sobre la estratègia utilitzada en els vehicles híbrids elèctrics per aconseguir que funcionin amb la major eficiència possible.

Les equacions utilitzades en el sistema són les següents;

$$\text{Acumulated fuel consumption}(g)(s) = \text{Instantaneous consumption}(s) \cdot 1/s \quad \text{Eq. 4.18}$$

$$\text{Acumulated fuel consumption}(l)(s) = \text{Instantaneous consumption}(s) \cdot 1/s \cdot k \quad \text{Eq. 4.19}$$

En la figura següent es poden veure els blocs i senyals que formen el sistema motor de combustió, realitzat mitjançant el programa SIMULINK®.

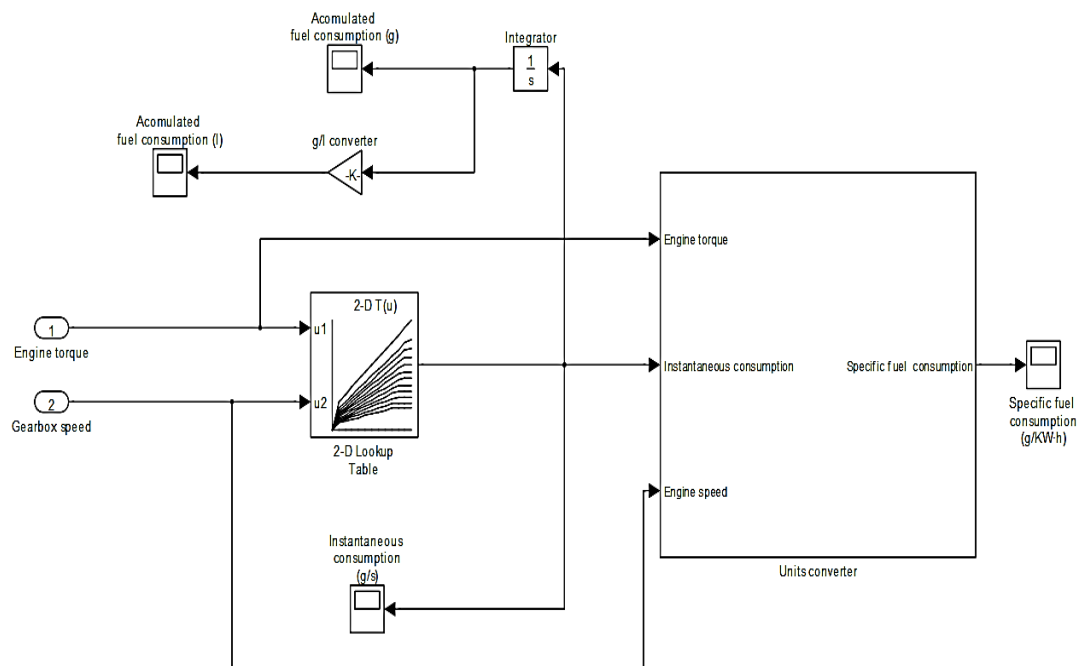


Figura 4.10 Sistema motor de combustió

A partir de les senyals d'entrada, parell i velocitat del motor, s'obté el consum instantani mitjançant el bloc *2D Lookup table*, on l'usuari haurà d'introduir el mapa de consum instantani comentat anteriorment i que dependrà de les característiques pròpies del motor estudiat.

Mitjançant el visor *Instantaneous consumption*, l'usuari podrà observar el consum de combustible del vehicle en funció del temps, a mesura que el vehicle recorre el cicle de conducció introduït en el simulador.

Si aquest consum es integra al llarg del temps s'obté el consum acumulat en grams i l'usuari el podrà observar mitjançant el visor *acomulated fuel consumption (g)*. (Note: The diagram uses 'acomulated' instead of 'accumulated').

També hi ha la possibilitat de veure aquest consum acumulat en litres, a través del visor *acomulated fuel consumption (l)*. Per obtenir aquest valor s'utilitza el convertidor d'unitats *g/l converter*, on l'usuari ha d'introduir la densitat del combustible *fd* a través del *workspace* del programa.

Seguidament es mostra el contingut del bloc *units converter*, que permet obtenir el consum específic de combustible al llarg del temps i on l'usuari podrà

visualitzar-lo a través del visor *specific fuel consumption g/KW·h*. L'equació utilitzada en aquest bloc és la següent;

$$\text{Specific fuel consumption}(t) = \frac{\text{Instantaneous consumption}(t)}{\text{Engine speed}(t) \cdot \text{Engine torque}(t)} \cdot 3600 \cdot 1 \cdot 10^3 \quad \text{Eq. 4.20}$$

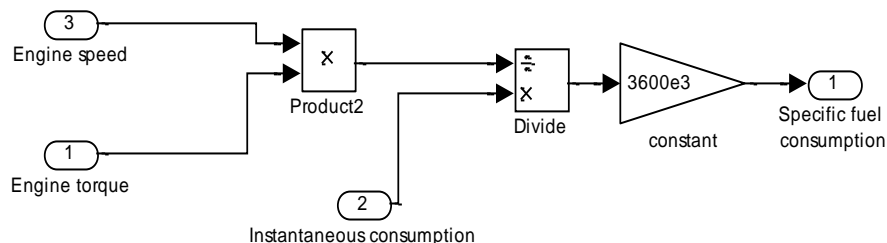


Figura 4.11 Bloc *units converter*

En el bloc anterior, el consum instantani es divideix per la potència instantània subministrada pel motor de combustió i obtinguda amb la multiplicació del parell *Engine torque(t)* per la velocitat angular del motor *Engine speed(t)*.

Aquest valor es multiplica per la constant de valor 3600e3 per obtenir el consum específic en les unitats adients de g/KW·h.

4.6 Sistema parell elèctric (*Electric torque*)

La funció d'aquest bloc és calcular el parell elèctric en l'eix del motor elèctric, en funció de la força elèctrica requerida pel conductor del vehicle, ja sigui per accelerar el cotxe com per a frenar-lo, a través de la frenada regenerativa.

Les equacions utilitzades en el subsistema són les següents;

$$\text{Total electric force}(t) = \text{Electric force}(t) \cdot \text{Brake force}(t) \quad \text{Eq. 4.21}$$

$$\text{Electric torque}(t) = \frac{\text{Total electric force}(t) \cdot W_r}{\text{Final gear ratio}(t)} \quad \text{Eq. 4.22}$$

En la figura següent es mostra el bloc en qüestió, amb tots els blocs i senyals que formen el subsistema.

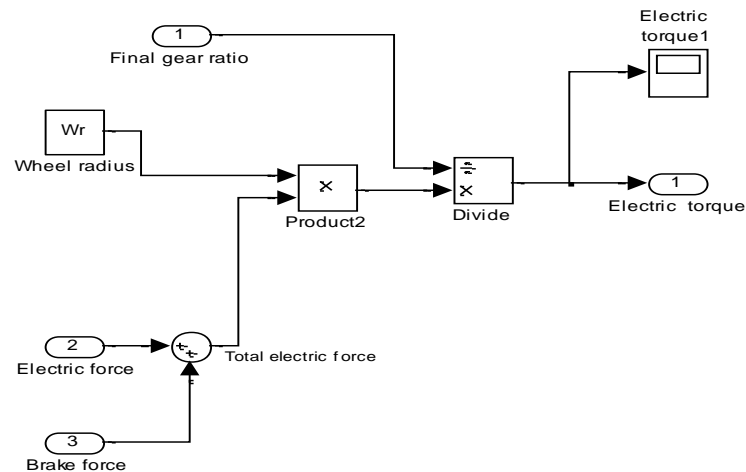


Figura 4.12 Sistema parell elèctric

Les senyals d'entrada d'aquest subsistema són la força elèctrica provinent del bloc [4.3. Distribució de força](#) i la força elèctrica provinent del bloc [4.11. Sistema de frenada regenerativa](#), en funció de si la força és de signe positiu, per tal d'accelerar el vehicle o si el signe és negatiu, per tal de frenar-lo.

Aquesta força es multiplica pel radi de la roda *wheel radius* i dividida per la relació de transmissió final per tal d'aconseguir el parell elèctric en l'eix del motor elèctric.

Mitjançant el visor *Electric torque 1* l'usuari pot veure el parell que es transmet a l'eix del motor elèctric, tant si el parell és positiu com negatiu. Si el parell es negatiu significa que el conductor desitja en aquell instant frenar el vehicle, a través de la frenada regenerativa.

4.7 Sistema motor elèctric (*Electric motor*)

L'objectiu d'aquest bloc és simular el comportament d'un motor elèctric d'un cotxe híbrid elèctric.

Les equacions utilitzades en aquest subsistema són les següents;

$$\text{if } \text{Electric torque} < 0 \quad \text{Electric power}(t) = \text{Gearbox speed}(t) \cdot \text{Electric torque}(t) \cdot \eta(t)$$

Eq. 4.23

$$\text{if } \text{Electric torque} > 0 \quad \text{Electric power}(t) = \frac{\text{Gearbox speed}(t) \cdot \text{Electric torque}(t)}{\eta(t)} \quad \text{Eq. 4.24}$$

on $\eta(t)$ és el rendiment del motor elèctric i es calcula a través de la taula 2-D *Lookup table*.

Per altra banda tenim;

$$\text{if } \text{Electric torque} > 0 \quad \text{Supplied energy}(s) = \text{Electric power}(s) \cdot \frac{1}{s} \quad \text{Eq. 4.25}$$

$$\text{if } \text{Electric torque} < 0 \quad \text{Recovered energy}(s) = \text{Electric power}(s) \cdot \frac{1}{s} \quad \text{Eq. 4.26}$$

A continuació es mostra el sistema realitzat amb el programa SIMULINK® amb tots els blocs i senyals que el formen.

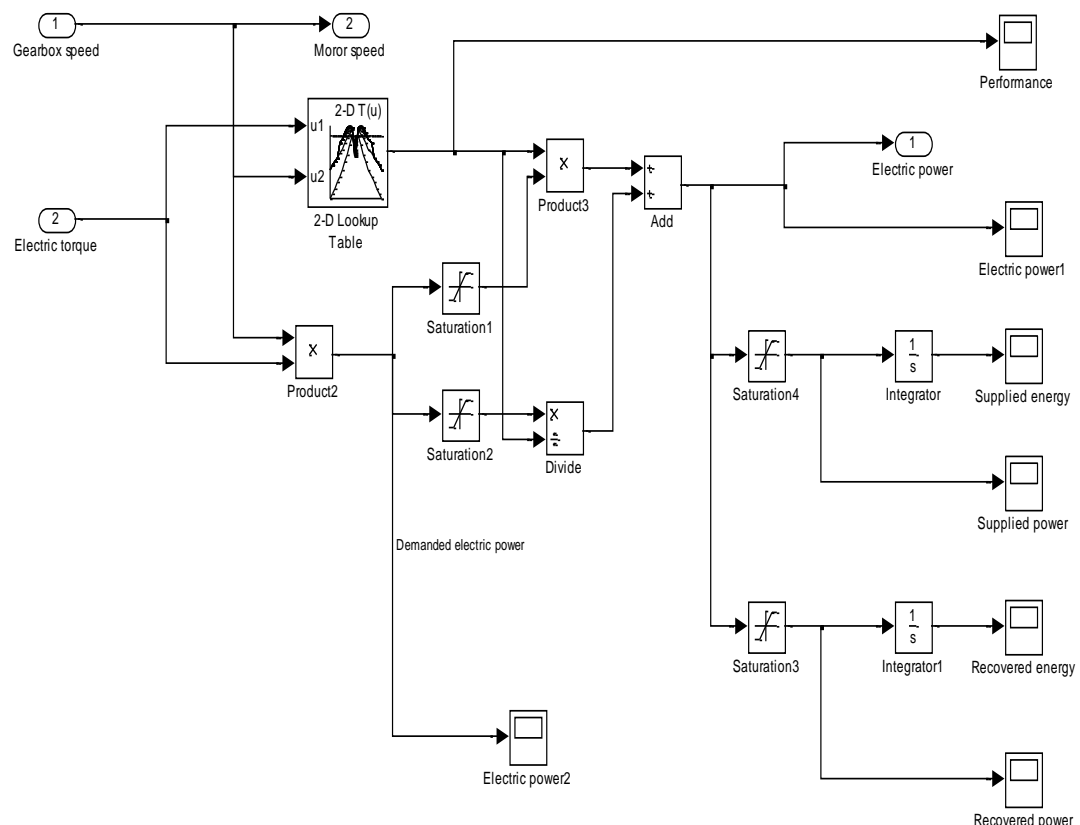


Figura 4.13 Sistema motor elèctric

En funció de la velocitat angular i el parell en l'eix del motor elèctric es calcula el rendiment del motor, mitjançant el bloc 2-D *Lookup Table*.

L'usuari pot veure el rendiment del motor elèctric a través del visor *performance*, amb una gràfica rendiment - temps. Les dades del rendiment del motor tenen que ser introduïdes per l'usuari en el simulador mitjançant el bloc comentat.

A continuació, en la figura següent es mostra un exemple en 3D del rendiment d'un motor elèctric en funció de la seva velocitat angular i el seu parell.

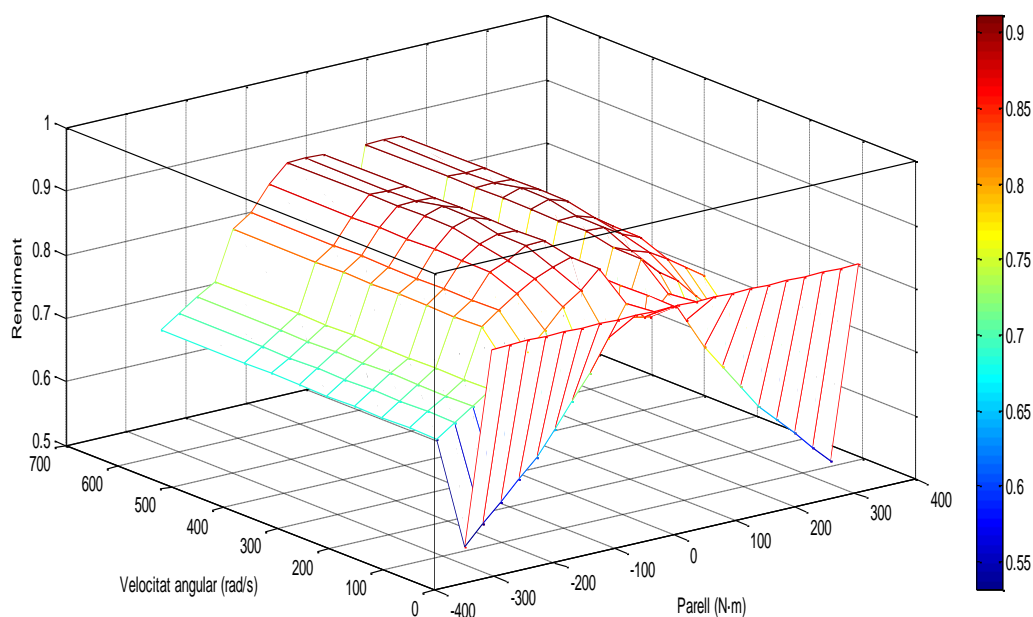


Figura 4.14 Exemple de rendiment d'un motor elèctric [25]

En la imatge anterior es pot veure com el rendiment és pràcticament constant pel que fa a la velocitat angular del seu eix, excepte per velocitats baixes, pròximes a 50 rad/s.

Pel que fa al parell, el seu rendiment màxim es situa al voltant dels 50 / -50 N·m i va disminuint a mesura que el valor del parell augmenta.

Cal destacar que el rendiment d'un motor elèctric és força superior al rendiment d'un motor de combustió, situant-se el primer al voltant del 85% i el segon al voltant del 40%. [26]

Aquesta característica pròpia dels motors elèctrics de proporcionar igualment bons rendiments per parells baixos, es té en compte a l'hora de dissenyar l'estratègia energètica del cotxe híbrid elèctric, tal com es podrà veure més endavant en el bloc mode d'operació.

En la [Figura 4.13](#), es poden veure els blocs *saturation1* i *saturation2*. La seva funció és separar la potència d'entrada en funció de si aquesta és negativa o positiva.

Un cop obtingut el rendiment del motor elèctric, aquest es multiplica per la potència elèctrica d'entrada, si aquesta és negativa, per tal d'aconseguir la potència real que s'enviarà a la bateria en el cas que el vehicle aprofiti l'energia de frenada a través del sistema de frenada regenerativa. Hi haurà una part d'aquesta energia d'entrada que no es podrà aprofitar, transformant-se en calor, per tant la potència d'entrada en aquest cas serà més gran que la de sortida.

Si en canvi la potència és positiva, aquesta es divideix pel rendiment per tal d'aconseguir l'energia que consumeix la bateria. En aquest cas l'energia d'entrada serà més petita que la de sortida i la bateria haurà de subministrar l'energia necessària.

A través del visor *Electric power1*, l'usuari pot veure la potència de sortida i a través del visor *Electric power2* la d'entrada.

Un cop més, es divideix aquesta potència de sortida en funció de si és positiva o negativa mitjançant els blocs *saturation4* i *saturation3*.

Si la potència és positiva, l'usuari pot veure la potència subministrada per la bateria mitjançant el visor *supplied power*. Si en canvi la potència és negativa, aquesta es veu a través del visor *recovered power* i és la potència recuperada pel fre regeneratiu.

Aquestes dos senyals són integrades per tal d'aconseguir l'energia elèctrica proporcionada al motor elèctric i l'energia recuperada pel vehicle en la frenada regenerativa. Mitjançant els visors *Supplied energy* i *Recovered energy* l'usuari pot veure aquesta informació.

4.8 Sistema dinàmica del vehicle (*Vehicle Dynamics*)

La funció d'aquest bloc és simular el comportament del vehicle des de el punt de vista dinàmic, per tal d'aconseguir la potència útil del vehicle en funció de la potència proporcionada pels motors i les pèrdues degudes a les forces de resistència que s'oposen al moviment del vehicle per la carretera.

Les equacions utilitzades en aquest sistema són les següents;

$$\text{Resultant force}(t) = \text{Engine force}(t) + \text{Electric force}(t) - \text{Total brake force}(t) \quad \text{Eq. 4.27}$$

$$a(t) = \frac{\text{Resultant force}(t) - \text{Force gravity resistance}(t) - \text{Force aerodynamic resistance}(t) - \text{Force rolling resistance}(t)}{M}$$

Eq. 4.28

$$\text{vehicle speed}(s) = a(s) \cdot \frac{1}{s} \quad \text{Eq. 4.29}$$

$$\text{Distance}(s) = \text{vehicle speed}(s) \cdot \frac{1}{s} \quad \text{Eq. 4.30}$$

$$\text{Vehicle power}(t) = \text{Resultant force}(t) \cdot \text{vehicle speed}(t) \quad \text{Eq. 4.31}$$

on $a(t)$ es l'acceleració del vehicle en funció del temps.

En l'[Annex III](#) d'aquest document hi ha més informació sobre aquestes forces de resistència, les seves característiques principals així com de les equacions utilitzades per al seu càlcul.

Seguidament es pot veure els blocs que conformen el sistema en qüestió, així com les seves senyals d'entrada i sortida.

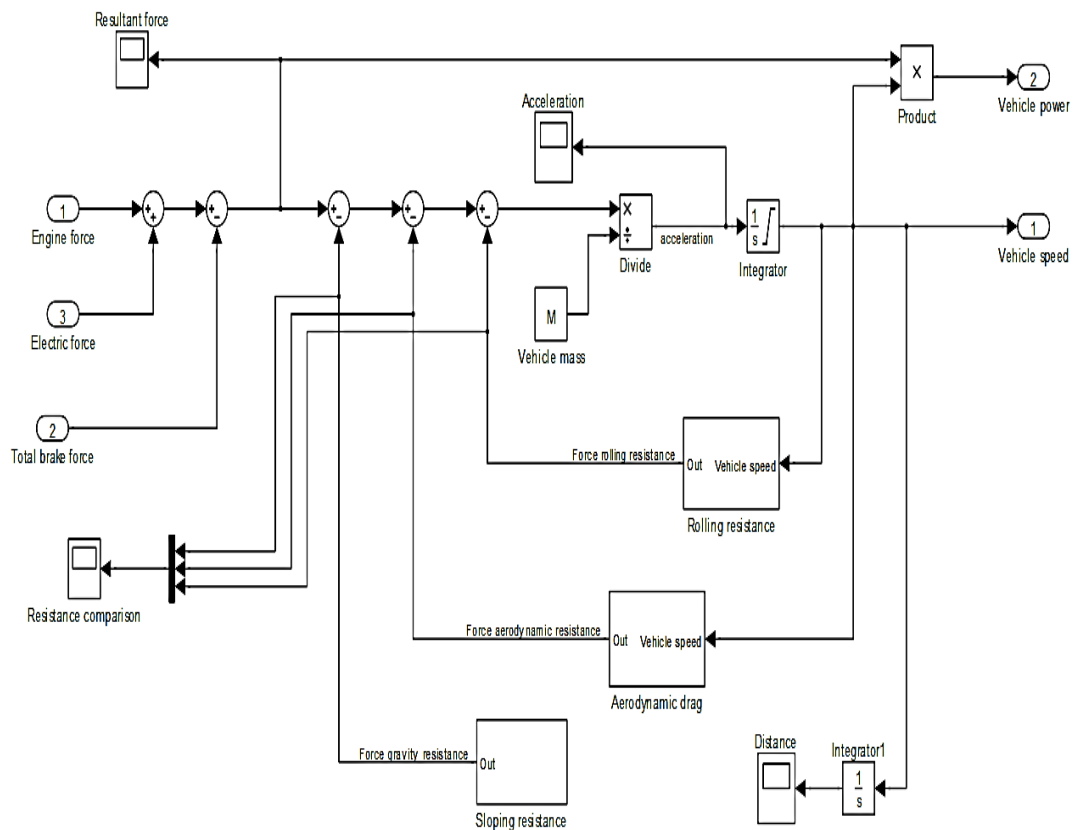


Figura 4.15 Sistema dinàmica del vehicle

En aquest bloc la força provinent del motor de combustió *engine force*, se suma amb la que ve del motor elèctric *electric force*. Al valor obtingut d'aquesta suma se li resta la força de frenada *Total brake force* per obtenir la força resultant.

Aquesta força resultant es proporciona pels sistemes de tracció i frenada del vehicle, per tal de que aquest últim s'adapti a les exigències del conductor i del recorregut que realitza. L'usuari pot veure en tot moment aquesta força a través del visor *Resultant force*.

Després, a la força resultant se li resta les forces de resistència del vehicle, que són la força de resistència al rodament, la resistència aerodinàmica i la resistència a la força de la gravetat.

Aquesta força útil es divideix per la massa del vehicle M , que l'usuari ha d'introduir en funció de les característiques del vehicle a través del *workspace*, proporcionant l'acceleració del vehicle. L'acceleració pot ser contemplada per l'usuari a través del visor *Acceleration* situat en el sistema per aquest fi.

Si finalment aquesta acceleració s'integra en funció del temps s'obté la velocitat real del vehicle. Aquesta velocitat es llegeix pel sensor del vehicle per tal de ser comparada en el bloc del conductor amb la velocitat que l'usuari ha introduït en el simulador.

Si aquesta velocitat real es multiplica per la força resultant s'aconsegueix obtenir la potència que proporciona el sistema de tracció del vehicle *vehicle power*.

A més a més, si aquesta velocitat es integrada mitjançant el bloc *Integrator1* s'aconsegueix la distància que recorre el vehicle en funció del cicle de conducció introduït en el sistema. L'usuari pot veure aquesta distància mitjançant el visor *Distance* situat en el mateix bloc.

També s'ha incorporat en el sistema un comparador que permet veure el grau d'importància de cada una de les forces de resistència al llarg del temps. L'usuari pot veure aquesta informació mitjançant el bloc *Resistance comparison*.

En la figura següent es mostra el contingut del bloc *Rolling resistance*, subsistema que calcula la resistència al rodament.

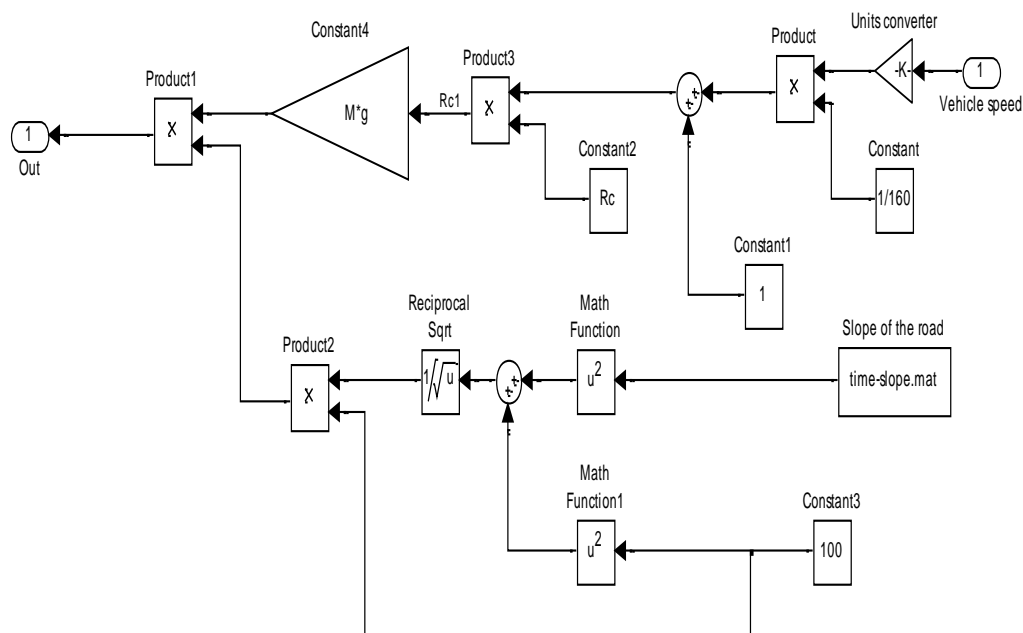


Figura 4.16 Resistència al rodament

L'usuari ha d'introduir a través del *workspace* de MATLAB® els valors de la massa del vehicle M , la gravetat g , el coeficient de resistència al rodament R_c i la pendent de la carretera en % a través del fitxer *time-slope.mat*.

La funció del bloc *units converter* és convertir les unitats de la velocitat de m/s a km/h, ja que les següents equacions del sistema funcionen amb aquestes unitats.

Per veure les equacions utilitzades en aquest subsistema i les seves característiques es pot observar l'[Annex III](#) del present estudi.

A continuació es mostren els bloc i senyals que formen el subsistema *Aerodynamic drag*, sistema que calcula la resistència aerodinàmica.

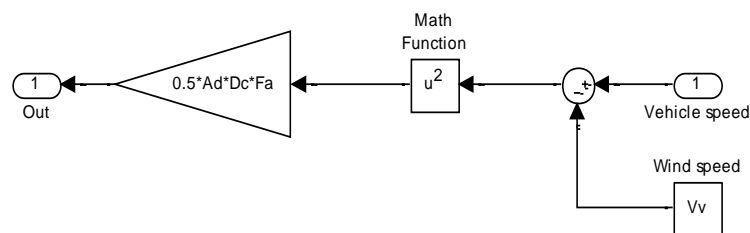


Figura 4.17 Resistència aerodinàmica

Igualment per aquest bloc, el lector pot veure les equacions utilitzades en aquest subsistema i les seves característiques en l'[Annex III](#) d'aquest document.

Per tal que aquest bloc funcioni correctament, l'usuari a d'introduir mitjançant el *workspace* del programa, els valors de les variables *Vv* velocitat del vent, *Fa* àrea frontal del vehicle, *Dc* coeficient de fregament aerodinàmic i *Ad* densitat del aire, utilitzant el sistema d'unitats internacional.

Seguidament es mostra el bloc *sloping resistance* el qual calcula la resistència deguda al pendent de la carretera.

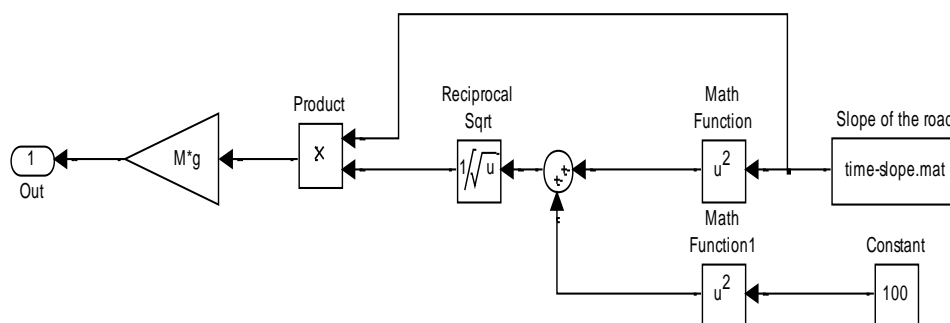


Figura 4.18 Resistència al pendent

Les variables que l'usuari a d'introduir en el subsistema són la massa M , la gravetat g i la pendent de la carretera en % *Slope of de road*.

Igualment com en els casos anteriors, es pot veure més informació sobre les equacions utilitzades en aquest bloc, així com les característiques principals d'aquesta resistència en l'[Annex III](#) del present estudi.

4.9 Sistema mode d'operació (*Operation mode*)

Aquest bloc intenta modelitzar el controlador del vehicle i la seva funció és governar els sistemes de tracció del vehicle per tal d'aconseguir la combinació més adequada en tot moment, la qual proporcionarà la màxima eficiència possible durant el cicle de conducció del vehicle híbrid elèctric.

Seguidament es mostra el bloc en qüestió i tots els blocs i senyals d'entrada i sortida que en formen part.

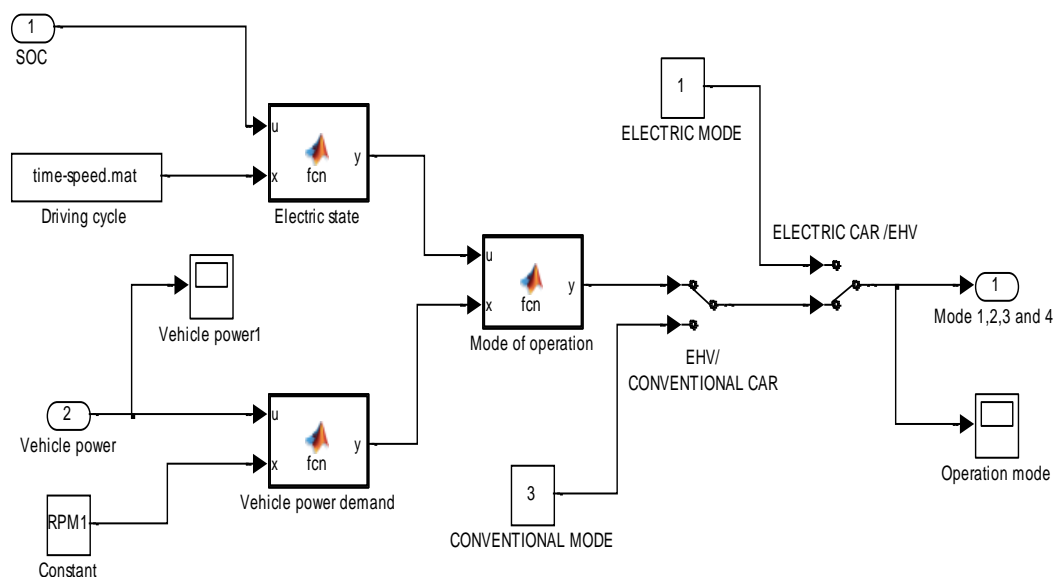


Figura 4.19 Sistema mode d'operació

Les variables d'entrada per aquest sistema són el SOC, el cicle de conducció *Driving cycle*, la potència del vehicle *Vehicle power* i la constant *RPM1* que l'usuari haurà d'introduir al sistema a través del *workspace* del programa.

L'estat de càrrega SOC, de l'anglès *State of charge*, és equivalent al indicador del dipòsit de combustible, però en aquest cas per la bateria del vehicle i les seves unitats són punts percentuals % (0% = bateria buida, 100% = bateria plena).

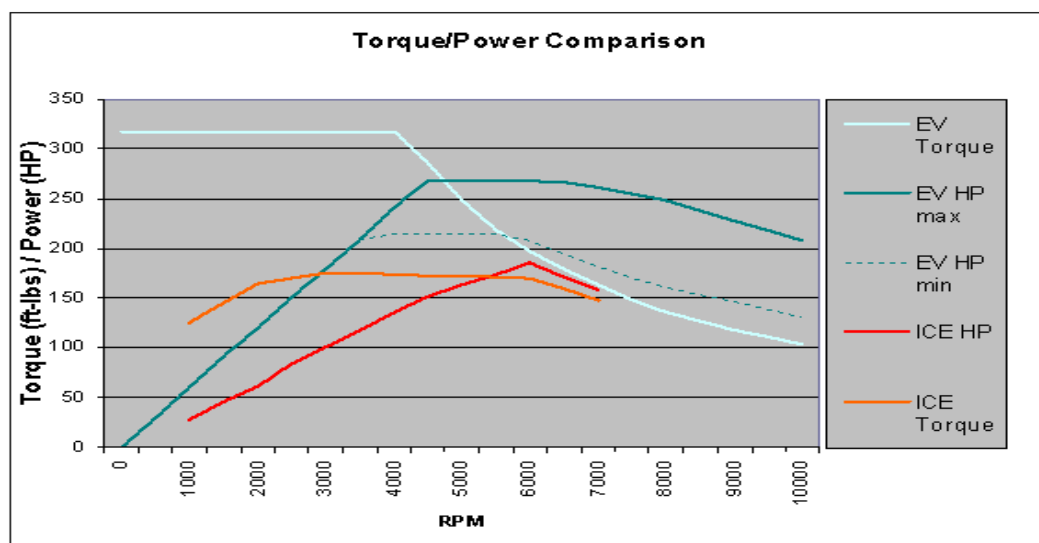
Aquesta variable es obtinguda en el sistema bateria, el qual s'explicarà més endavant en el punt [4.13. Sistema bateria](#).

Pel que fa al cicle de conducció, com s'ha comentat anteriorment, l'usuari haurà d'introduir el cicle de conducció que vol analitzar amb el simulador a través del fitxer *time-speed.mat*, en el *workspace* del programa.

Els modes de funcionament del vehicle híbrid elèctric són quatre. El mode 1 és el mode d'operació en elèctric pur, el mode 2 és el mode híbrid, el mode 3 és el mode d'operació en combustió pura i el mode 4 és el mode de recàrrega de la bateria.

Si s'observa la [Figura 4.14](#) anterior sobre el rendiment del motor elèctric, es pot veure com aquest és més alt quan el parell motor que proporciona és baix, és a dir, quan funciona al voltant de la seva velocitat nominal. No obstant això, el parell mecànic que pot proporcionar en l'arrencada és molt més alt que el que pot oferir el motor de combustió i amb rendiments superiors.

En la imatge de continuació es pot veure una comparativa entre les característiques del motor elèctric i les del motor de gasolina.



Imatge 41 Comparativa entre el motor elèctric i el motor de combustió [26]

Tenint en compte aquesta característica pròpia dels motors elèctrics, hem d'intentar que aquest funcioni sempre quan tenim velocitats de funcionament del vehicle baixes, ja que el parell que es necessitarà en aquestes condicions serà alt, com per exemple en cicles d'arrencada i aturada freqüents, com els que tenen lloc en els cicles urbans.

Per tant, si la velocitat del vehicle és baixa, per sota d'un cert valor i el nivell de la bateria és suficientment alt, per sobre d'un cert valor, s'activarà el mode de funcionament 1 i el vehicle funcionarà tant sols utilitzant el motor elèctric.

Si es mira ara la [Figura 4.9](#), es pot veure com el consum específic d'un motor de combustió és baix quan la seva velocitat és relativament alta i és alt en velocitats baixes o molt altes.

Tenint en consideració aquesta característica dels motors de combustió, a partir d'una certa velocitat del vehicle es podrà posar en funcionament el motor de combustió, ja que podrà oferir uns bons rendiments i el consum de combustible serà baix.

Per tant, a partir d'una certa velocitat de funcionament s'activarà el mode de funcionament 2, el mode híbrid. En aquest mode, si la demanda de potència és alta, funcionaran els dos motors del vehicle, tant el motor elèctric com el de combustió. Si en canvi, la potència requerida és inferior a la potència òptima que pot proporcionar el motor de combustió, una part d'aquesta potència de combustió es transformarà en energia elèctrica a través del motor elèctric funcionant com a generador.

En aquest mode, el motor de combustió funcionarà proporcionant en tot moment el parell òptim, dins d'un cert rang de velocitats i la resta de potència requerida serà subministrada pel motor elèctric en cas que sigui necessari.

Si el nivell de la bateria SOC baixa per sota d'un cert valor, s'activarà el mode de funcionament 3, on el motor de combustió és l'únic motor que funciona en aquest mode.

Es en aquest mode de funcionament on el motor elèctric funciona com a generador en tot moment, recarregant la bateria de nou en cas que l'energia cinètica del vehicle sigui superior a la requerida pel conductor.

Si finalment el vehicle està funcionant amb una velocitat igual a zero, s'activarà el mode de funcionament 4, on la bateria es recarregada aprofitant els moments

on el conductor té l'obligació d'aturar-se, com per exemple en un pas de vianants.

Mitjançant el bloc *electric state*, es fa una primera separació de modes de funcionament en funció de la velocitat del vehicle i del SOC de la bateria.

A continuació es pot veure el codi utilitzat en aquest bloc.

```
function y = fcn(u,x)
%#codegen
if (x>0) && (u>80)
y=0;
elseif (x==0) && (u<=100)
y=2;
else
y=1;
end
```

4.20 Codi del bloc *electric state*

Si la velocitat del vehicle és més gran que zero i el SOC de la bateria és superior a un cert valor en % determinat per l'usuari en el bloc de control i que en aquest exemple és 80 %, la sortida del bloc serà 0.

Segons l'estratègia de control de Màxim SOC, comentada en l'apartat anterior sobre els tipus de vehicles híbrids elèctrics, és recomanable que aquest valor sigui alt, per tal de que el motor elèctric pugui proporcionar energia de suport en els moments on es presentin pics de demanda.

Si en canvi la velocitat és 0 m/s i el SOC és inferior o igual a 100 % la sortida del bloc serà 2.

Finalment si les condicions anteriors no es compleixen la sortida del bloc serà 1.

El valor mínim del SOC dependrà de les característiques pròpies del vehicle híbrid elèctric i del seu grau d'híbridació. És a dir, com més gran sigui el motor elèctric i la seva bateria associada, més baix podrà ser el valor mínim del SOC i el motor elèctric funcionarà més temps en cada cicle de conducció.

L'usuari haurà d'introduir aquest valor en funció de les característiques del vehicle a través del codi del bloc comentat.

El bloc *Vehicle power demand* s'utilitza per comparar la potència mecànica que subministren els motors de tracció del vehicle respecte a un cert valor de potència que l'usuari haurà d'introduir al sistema mitjançant la variable *RPM1* en el *workspace*.

A continuació es mostra el codi utilitzat en aquest bloc.

```
function y = fcn(u,x)
%#codegen

if u>x
    y=1;
else
    y=0;
end
```

Figura 4.21 Codi del bloc *vehicle power demand*

Si la potència del vehicle és superior a un cert valor proporcionat per l'usuari la sortida serà 1, si en canvi és inferior o igual la sortida serà 0.

Aquesta constant de referència *RPM1* dependrà de les característiques del motor de combustió i del grau d'hibridació del vehicle i es basa en l'estratègia de control per Termòstat comentada en l'anterior apartat.

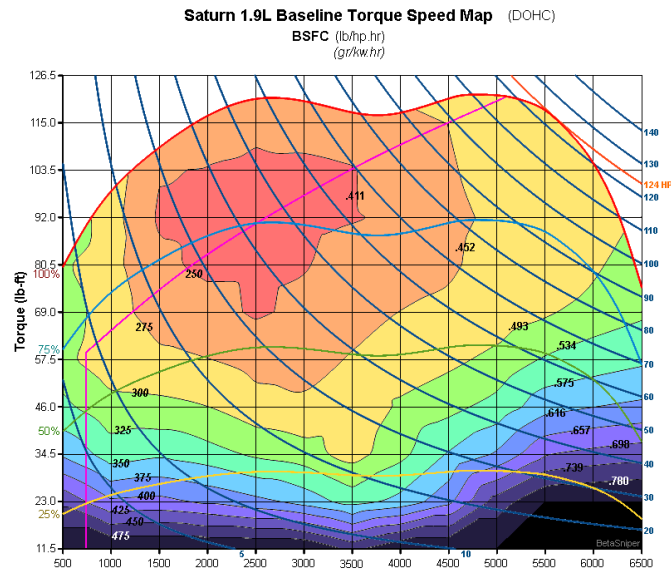
El principi bàsic es que la font primària d'energia *FP* funcioni al seu punt òptim i que la font secundària *FS* actuï com un equalitzador, com;

$$P_{FS} = P_D - P_{FP_{opt}} \quad \text{Eq. 4.32}$$

on P_{FS} és la potència proporcionada per la font secundària, P_D és la potència de demanda i $P_{FP_{opt}}$ és el punt de potència més eficient de la font primària del vehicle. [28]

Per determinar aquest punt s'ha d'estudiar en cada cas en funció del mapa d'eficiència del motor de combustió.

Si s'observa l'exemple següent del mapa d'eficiència d'un motor de combustió, tenim que el seu punt òptim es troba situat al 75% de la seva potència nominal i que a partir del 25 % ja presenta consums de combustible acceptables.



Imatge 4.2 Exemple de mapa d'eficiència d'un motor de combustió [27]

A partir d'una certa potència de demanda $RPM1$ ja es podrà engegar el motor de combustió amb rendiments acceptables i a més a més s'aconsegueix que en conducció urbana, on els cicles d'acceleració i frenada són freqüents, la demanda de parell és alta i la de velocitat és baixa, el vehicle funcioni en mode d'operació 1, on tant sols el motor elèctric proporciona la potència requerida.

En el bloc *Mode of operation*, s'aconsegueixen finalment els diferents modes d'operació en que funcionarà el vehicle al llarg del seu cicle de conducció. La sortida d'aquest bloc serà el mode i aquest pot agafar valors de 1,2,3 o 4. A continuació es mostra el codi utilitzat per aquest bloc del sistema.

```
function y = fcn(u,x)
%#codegen
if (u==0) && (x==0)
y=1;
elseif (u==0) && (x==1)
y=2;
elseif (u==2)
y=4;
else
y=3;
end
```

Figura 4.22 Codi del bloc *mode of operation*

En el sistema mode d'operació s'han afegit dos visors per tal de que l'usuari pugui veure la potència que subministra el vehicle i els canvis en el mode de funcionament durant el cicle de conducció. Aquesta informació es visualitza a través dels visors *Vehicle power1* i *Operation mode*.

A més a més, s'han afegit dos interruptors manuals amb els noms de *EHV / CONVENTIONAL CAR* per una banda i *ELECTRIC CAR / EHV* per l'altra. Fixant aquests interruptors a la posició correcta, l'usuari podrà canviar d'un tipus de vehicle a un altre i d'aquesta manera comparar els resultats entre un tipus de vehicle i un altre amb les mateixes característiques tècniques pel que fa als seus motors.

S'ha de tenir en compte que aquests canvis entre vehicles són aproximacions i que no es tenen en consideració alguns canvis tècnics que es produirien en una comparació real, com són el canvi de la massa del vehicle, la transmissió i altres components que formen part del vehicle.

4.10 Sistema de transmissió (*Transmission*)

L'objectiu d'aquest bloc és simular el comportament d'una caixa de canvis d'un cotxe. La caixa de canvis influeix d'una forma important en el comportament energètic d'un vehicle degut a les limitacions del motor de combustió, ja que aquest necessita un règim de gir suficient per proporcionar un parell suficient per accelerar el vehicle.

El motor elèctric ajuda a solucionar en gran part aquestes mancances de parell mecànic degut a les seves característiques. Tot i així, els vehicles híbrids elèctrics més avançats incorporen transmissions automàtiques basades en engranatges planetaris per tal de millorar el rendiment del vehicle i la transmissió.

A més a més, cal destacar que el conductor del vehicle juga una paper clau en l'eficiència global del vehicle i el seu estil de conducció i la utilització de la marxa més adequada en cada moment és vital per aconseguir bones relacions de consums, al igual que el evitar les acceleracions i les frenades brusques.

Per realitzar el simulador s'ha modelitzat un canvi de velocitats manual de 5 marxes, per tal d'aconseguir la relació de transmissió final i la velocitat de l'eix del motor en funció de la velocitat del vehicle.

Les equacions utilitzades en el subsistema són les següents;

$$Final\ gear\ ratio(t) = Gr_i(t) \cdot Gr_d \quad Eq. 4.33$$

$$Gearbox\ speed(t) = Final\ gear\ ratio(t) \cdot vehicle\ speed(t)/Wr \quad Eq. 4.34$$

on Gr_i és la relació de transmissió de la marxa i que el conductor va introduint al llarg del recorregut a través del canvi de marxes en funció de les característiques del cicle de conducció i Gr_d la relació de transmissió del diferencial.

A continuació es poden observar els bloc i les senyals utilitzades per modelitzar el sistema de transmissió del vehicle.

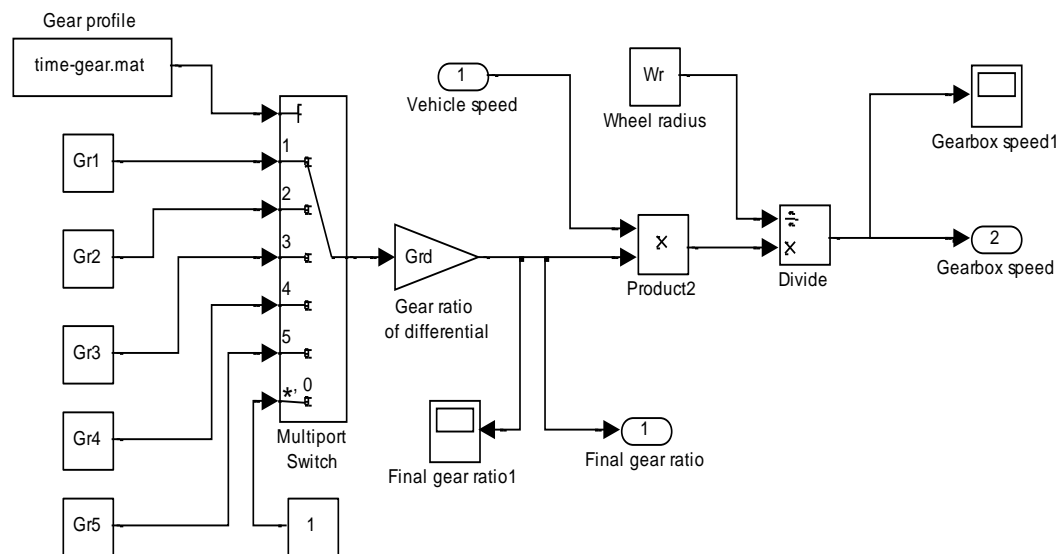


Figura 4.23 Sistema de transmissió

L'usuari haurà d'introduir a través del fitxer *time-gear.mat* la marxa del canvi en funció del temps (1,2,3,4 o 5).

També haurà d'introduir a través del *workspace* les relacions de transmissió de cada velocitat. *Gr1* per la primera velocitat, *Gr2* per la segona, *Gr3* per la tercera, *Gr4* per la quarta i *Gr5* per la cinquena.

A partir de la marxa en que l'usuari desitgi que funcioni el cotxe, el bloc *Multiport Switch* proporcionarà la relació de transmissió pertinent. Ha sigut necessari introduir en el port 0 la constant 1 per tal que la relació de transmissió del canvi de velocitats no sigui mai zero i el simulador funcioni correctament.

Aquesta relació de transmissió es multiplica per la relació de transmissió del diferencial *Grd*, la qual l'usuari també haurà d'entrar al sistema.

En aquest punt obtenim la relació de transmissió final *Final gear ratio* i l'usuari podrà determinar el seu valor a través del visor *Final gear ratio 1*. Aquesta senyal es envia als blocs pertinents com a variable d'entrada per la seva utilització posterior.

Si aquesta relació de transmissió la multipliquem per la velocitat del vehicle *Vehicle speed* i el resultat el dividim pel radi de la roda *Wheel radius* obtenim la velocitat en l'eix motor *Gearbox speed*. Per a veure el valor d'aquesta velocitat, l'usuari pot fer servir el visor corresponent *Gearbox speed 1*.

4.11 Bloc sensor de velocitat (*Sensor block*)

La funció d'aquest subsistema és simular el comportament d'un sensor de velocitat real. S'ha cregut pertinent incorporar aquest bloc per tal que introdueixi un cert soroll en la senyal captada pel sensor de velocitat, tal com es produiria en un sensor de velocitat real. Seguidament es mostra l'interior d'aquest bloc.

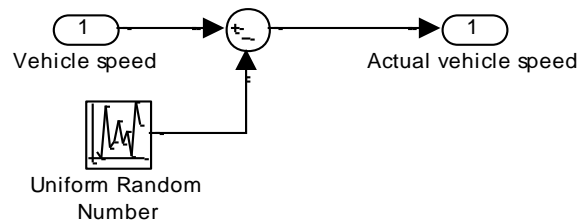


Figura 4.24 Bloc sensor de velocitat

Per simular aquest soroll s'utilitza el bloc *Uniform Random Number*, incorporat en la llibreria de SIMULINK®.

A partir de la senyal d'entrada *Vehicle speed*, que és la velocitat en que funciona el cotxe, se li suma una petita senyal aleatòria on la seva magnitud varia entre - 0.01 a 0.01 m/s que aproximadament és el 0,3‰ del valor màxim de la velocitat per tal de justificar el soroll real dels sensors de velocitat.

Aquest soroll varia en funció de les característiques i la qualitat del sensor utilitzat per a mesurar la velocitat del vehicle.

Aquesta senyal distorsionada es envia al bloc del conductor perquè sigui comparada amb la velocitat desitjada.

4.12 Sistema de frenada regenerativa (*Brakes System*)

El sistema de frenada regenerativa és propi dels vehicles elèctrics i híbrids i la seva funció és recuperar l'energia sobrant quan es redueix la velocitat del vehicle, transformant part de la seva energia cinètica en energia elèctrica.

Aquesta energia es emmagatzemada a la bateria del vehicle i pot ser aprofitada més endavant quan el vehicle requereixi el funcionament del motor elèctric.

Tot i aquest avantatge, el frenat tradicional basat en la fricció i on tota l'energia es perd en forma de calor, es continua usant en els vehicles híbrids elèctrics. El motiu és que el frenat regeneratiu no és capaç d'absorbir sempre tota l'energia de frenada, ja sigui perquè la bateria està plena o per la pròpia capacitat d'absorció del sistema, provocant que s'activi el fre reostàtic per tal d'absorbir l'excés d'energia, quan per exemple el conductor ha de realitzar una frenada d'emergència.

El fre regeneratiu és efectiu a velocitats baixes on el vehicle no acumula molta energia cinètica o quan les desacceleracions són suaus.

En el simulador, el sistema de frenada regenerativa recupera tota l'energia sobrant provinent de la senyal de frenada del bloc conductor, sempre i quan, el motor elèctric funcionant com a generador tingui la suficient capacitat per absorbir-la.

L'equació utilitzada en el sistema es la següent;

$$Wheel\ force(t) = \frac{Final\ gear\ ratio(t) \cdot Max.torque(t)}{Wr} \quad Eq. 4.35$$

on *Max.torque* és el parell màxim de frenada que pot proporcionar el motor elèctric funcionant com a generador.

Seguidament es mostra el subsistema realitzat amb el programa per modelitzar aquest fre regeneratiu i les senyals i blocs que en formen part.

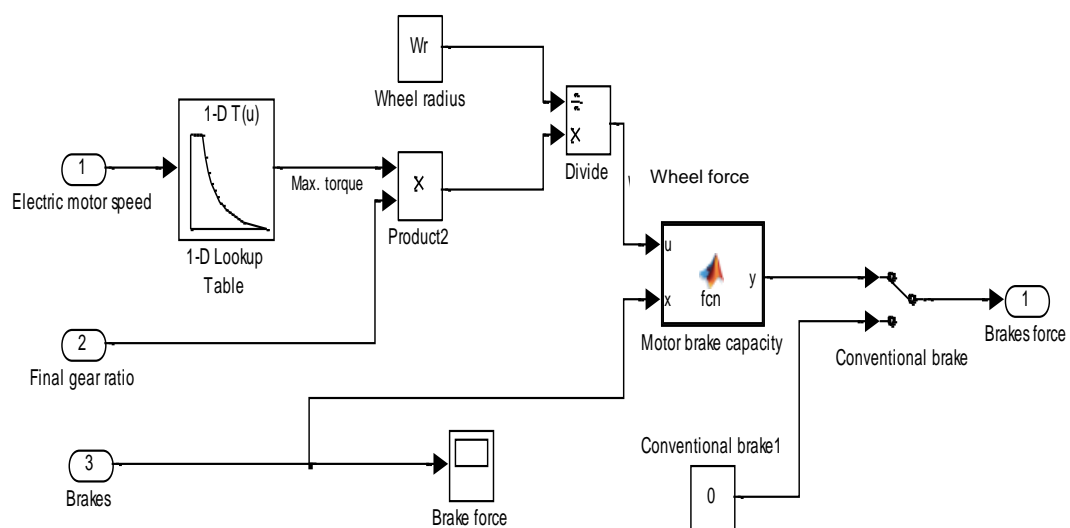


Figura 4.25 Sistema de frenada regenerativa

En aquest bloc la velocitat del motor elèctric *Electric motor speed* s'envia al bloc *1-D Lookup Table* per tal d'aconseguir el parell màxim de frenada que pot proporcionar el motor elèctric funcionant com a generador.

L'usuari del simulador haurà d'introduir a través d'aquest bloc la informació del parell màxim *Max. Torque*, en funció de la velocitat en l'eix motor.

A continuació es mostra una corba típica realitzada amb MATLAB®, de parell mecànic en funció de la velocitat angular per a un motor elèctric.

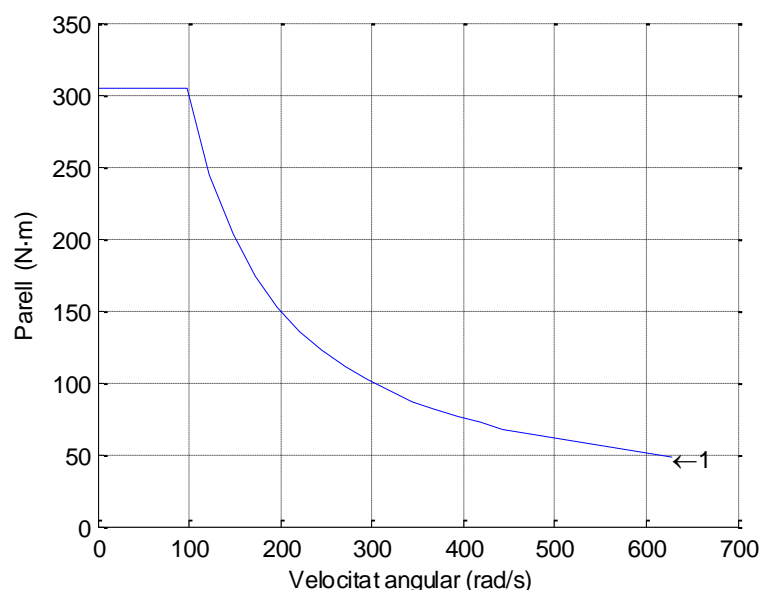


Figura 4.26 Parell d'un motor elèctric en funció de la velocitat angular

Si ens fixem en la figura anterior i com s'ha comentat anteriorment a l'hora d'explicar l'estratègia energètica per als vehicles híbrids elèctrics, el parell mecànic proporcionat per un motor elèctric és gran a velocitats baixes i va disminuint exponencialment a partir d'una certa velocitat a mesura que la seva velocitat angular augmenta.

Aquest parell màxim es multiplica per la relació de transmissió final *Final gear ratio* i posteriorment dividit pel radi de la roda *Wheel radius* per tal d'aconseguir la força de frenada en la roda del vehicle.

Aquesta informació es compara amb la força de frenada *Brake force* en el bloc *Motor brake capacity*. En la figura següent es mostra el codi utilitzat en aquest bloc.

```
function y = fcn(u,x)

%#codegen

if u<x

    y=-u;

else

    y=-x;

end
```

Figura 4.27 Codi del bloc *Motor brake capacity*

Si la força de frenada requerida és més gran que la que pot absorbir el motor elèctric funcionant com a generador, la força que es recuperarà serà només la màxima que pot absorbir el generador, la resta es perdrà en forma de calor.

Si per el contrari, la força de frenada requerida és més petita que la capacitat màxima del motor elèctric funcionant com a fre, tota l'energia de frenada serà recuperada.

El signe negatiu en ambdós casos mostra com el sentit que recorre l'energia és negatiu, és a dir, que el motor elèctric no consumeix energia sinó que la recupera i aquesta es emmagatzemada a la bateria posteriorment mitjançant el bloc bateria.

A més a més, s'ha afegit un interruptor manual en el sistema amb el nom de *Conventional brake*. D'aquesta manera si l'usuari ho troba adient, pot desconnectar el fre regeneratiu de tal forma que actuarà com un fre convencional i el sistema no recuperarà energia en la frenada.

Mitjançant el visor *brake force*, l'usuari podrà veure la força de frenada requerida pel conductor en tot moment.

4.13 Sistema bateria (*Electric System*)

La funció d'aquest bloc en el simulador és modelitzar el comportament d'una bateria elèctrica d'un cotxe híbrid elèctric, per tal de calcular el nivell de càrrega de la bateria SOC al llarg del cicle de conducció del vehicle.

En els vehicles híbrids elèctrics que no incorporen la tecnologia *plug-in*, aquest nivell de càrrega s'ha de mantenir alt en tot moment, per tal que un cop realitzat un cicle de conducció, hi hagi suficient energia emmagatzemada en la bateria per a que el motor elèctric pugui funcionar en condicions de conducció urbana i d'aquesta manera aconseguir una eficiència global òptima en cada cicle de conducció.

Les equacions utilitzades en el subsistema són les següents;

$$\text{Electric current}(t) = \text{Electric power}(t)/Bv \quad \text{Eq. 4.36}$$

$$\text{Electric power } Ri(t) = \text{Electric current}^2(t) \cdot Ri \quad \text{Eq. 4.37}$$

on Bv és el voltatge de la bateria, Ri és la resistència interna de la bateria i *Electric power* és la potència elèctrica provinent del motor elèctric / generador.

Per altra banda tenim;

$$\text{Electric energy}(s) = (\text{Electrical losses}(s) + \text{Electric power}(s) + \text{Electric power } Ri(s)) \cdot \frac{1}{s} \quad \text{Eq. 4.38}$$

$$SOC(t) = SOCi - \frac{\text{Electric energy}(t)}{Cap} \cdot k \quad \text{Eq. 4.39}$$

on Cap és la capacitat de la bateria i k és el factor de conversió per passar la relació de la capacitat de la bateria a tant per cent.

Tot seguit, en la figura següent es mostra el sistema bateria i tots els blocs que en formen part.

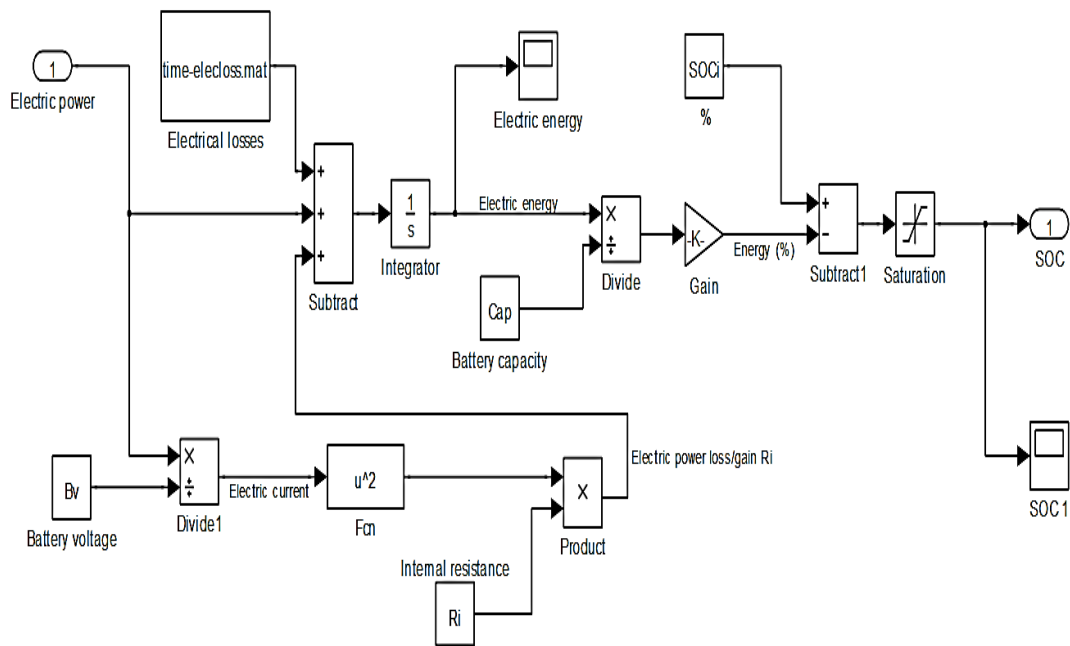


Figura 4.28 Sistema bateria

Mitjançant el bloc *Subtract*, es sumen les potències que influeixen en el nivell de càrrega de la bateria i aquestes són les pèrdues elèctriques *Electric Losses*, la potència elèctrica del motor elèctric *Electric power* i la pèrdua de potència provocada per la resistència interna de la bateria *Electric power loss/gain Ri*.

Les pèrdues elèctriques són degudes als aparells elèctrics que incorporen els cotxes i que consumeixen energia de la bateria, com ara l'aire condicionat, la radio o les llums.

Per introduir aquestes pèrdues, l'usuari haurà de fer servir el fitxer *time-elecloss.mat*, on s'indiquen les pèrdues elèctriques en funció del temps al llarg del cicle de conducció.

Pel que fa a la potència provinent del motor elèctric, aquesta podrà ser tant positiva com negativa, en funció de si el motor elèctric funciona com a tal i consumeix energia o si es comporta com a generador elèctric emmagatzemant energia a la bateria.

El càlcul de la pèrdua de potència provocada per la resistència interna de la bateria serveix per modelitzar el rendiment de la bateria, és a dir, per tenir en compte les pèrdues internes que es produïrien en una bateria real.

Per calcular la potència d'aquesta resistència interna, situada en sèrie amb la càrrega del motor elèctric, es calcula primer la intensitat del circuit elèctric modelitzat.

Per aconseguir aquesta intensitat *Electric current*, es divideix la potència d'entrada pel voltatge que subministra la bateria *Battery voltage*. L'usuari ha d'introduir el valor del voltatge de la bateria a través del *workspace* del programa com a dada.

Si aquesta intensitat es elevada al quadrat i després multiplicada per la resistència interna R_i s'obté la pèrdua de potència deguda a la resistència interna. El valor d'aquesta resistència interna haurà de ser introduïda en el sistema a través del *workspace*.

Degut a l'efecte d'elevat al quadrat un número negatiu, tant fa que el flux d'energia provinent del motor elèctric funcionant com a generador sigui negatiu, ja que igualment s'obindrà una pèrdua de potència en valor positiu que consumirà energia de la bateria.

Un cop obtinguda la potència total, aquesta es integrada mitjançant el bloc *Integrator* per aconseguir l'energia consumida/recuperada en la bateria. L'usuari pot veure el valor d'aquesta energia a través del visor *Electric energy* situat en el sistema.

Si aquesta energia es dividida per la capacitat de la bateria *Battery capacity*, tenim una relació en tant per u de l'energia consumida/recuperada al llarg del cicle de conducció. Aquesta capacitat Cap haurà de ser introduïda per l'usuari mitjançant el *workspace* del programa en funció de les característiques de la bateria elèctrica.

Si aquesta relació la multipliquem per 100 mitjançant el bloc *Gain*, aconseguim l'energia que consumeix o proporciona la bateria en tant per cent.

Finalment al SOC inicial SOC_i , se li resta l'energia recuperada/consumida en % per aconseguir el nivell de càrrega de la bateria SOC en tant per cent.

El SOC inicial SOC_i l'ha d'introduir l'usuari a través del *workspace* i indica el nivell de càrrega en % que disposa la bateria en l'inici del cicle de conducció.

L'usuari podrà observar el nivell de la bateria SOC al llarg del cicle de conducció a través del visor situat en el sistema anomenat $SOC1$.

5 Resultats de les simulacions

A continuació es presenten els resultats obtinguts d'una sèrie de simulacions realitzades amb el model SIMULADOR, model creat amb el programa SIMULINK® per aquest estudi.

Aquestes simulacions s'han dividit en quatre parts per tal d'estudiar separatament parts específiques en relació a l'estudi energètic del vehicle híbrid elèctric i poder així treure unes conclusions més adients.

En la primera part es comprova el funcionament del model, mostrant informació detallada dels visors més importants del model. Igualment s'estudia com influeix el cicle de conducció en el comportament energètic del vehicle i com influeixen cada una de les forces de resistència en el vehicle.

En la segona part s'estudia com influeix l'estratègia energètica dels modes de funcionament en l'eficiència global del vehicle, realitzant un anàlisi de sensibilitat modificant certs paràmetres de control del bloc mode d'operació.

En la tercera part es compara l'eficiència energètica del vehicle híbrid elèctric amb el vehicle convencional i amb el vehicle elèctric.

Finalment, en l'última part s'analitza la fiabilitat del model creat, comparant els resultats obtinguts pel que fa als consums de combustible amb dades oficials.

A continuació, es mostren una sèrie de dades d'entrada al model comunes a totes les simulacions realitzades i que fan referència a característiques pròpies dels motors, al cicle de conducció i a altres característiques tècniques del vehicle i els seus components.

Pel que fa a les característiques tècniques del vehicle, les dades s'han extret del programa ADVISOR®. Concretament pertanyen a un Toyota Prius Primera Generació NHW10 amb les següents característiques; [30]

Motor de gasolina 1.5L 1NZ-FXE DOHC I4
13.5:1 de compressió
43 KW (58 hp) a 4000 rpm
102 N·m a 4000 rpm

Motor elèctric 288 V

30 KW (40 hp) a 940 rpm

305 N·m a 0 rpm

ADVISOR® és un programa lliure de simulació avançada, creat pel Laboratori d'Energies Renovables del Departament d'Energia dels EUA. Està basat en MATLAB/SIMULINK i permet realitzar anàlisis del rendiment i de l'estalvi en combustible de vehicles lleugers i pesats, amb trens de tracció convencionals, elèctrics, híbrids o de cèl·lules de combustible. [25]

5.1 Paràmetres d'entrada comuns

Pel que fa al contingut del fitxer *time-speed.mat*, respecte al cicle de conducció, s'ha utilitzat en tot moment el cicle de conducció estàndard NEDC. Es pot veure més informació d'aquest cicle en l'[Annex I](#) del present estudi.

En la taula següent es mostren les variables d'entrada comunes a totes les simulacions realitzades, les quals estan contingudes en el fitxer *parameters.mat* adjunt al model creat amb SIMULINK®.

Variable	Nom	Valor
<i>Ms</i>	Velocitat màxima	170 km/h
<i>At</i>	Temps d'acceleració	24 s
<i>M</i>	Massa del vehicle	1398 kg
<i>Bd</i>	Distància de frenada	15 m
<i>Wr</i>	Radi de la roda	0,287 m
<i>Rs</i>	Senyal de recàrrega	-50 N
<i>fd</i>	Densitat del combustible	749 g/l
<i>g</i>	Gravetat	9,81 m/s ²
<i>Rc</i>	Coefficient de resistència al rodament	0,009
<i>Ad</i>	Densitat de l'aire	1,2 kg/m ³
<i>Dc</i>	Coefficient de fregament aerodinàmic	0,3
<i>Fa</i>	Àrea frontal del vehicle	1,746 m ²
<i>Vv</i>	Velocitat del vent	0 m/s
<i>Gr1</i>	Relació de transmissió velocitat 1	6,932
<i>Gr2</i>	Relació de transmissió velocitat 2	3,821
<i>Gr3</i>	Relació de transmissió velocitat 3	2,224
<i>Gr4</i>	Relació de transmissió velocitat 4	1,406

$Gr5$	Relació de transmissió velocitat 5	0,406
Grd	Relació de transmissió diferencial	3,4
Cap	Capacitat de la bateria	6120000 W·s
$SOCi$	SOC inicial	100 %
Bv	Voltatge de la bateria	288 V
Ri	Resistència interna de la bateria	0,597 Ω

Taula 5.1 Variables comunes utilitzades en les simulacions

Pel que fa al parell òptim del motor de combustió, els vectors utilitzats en el bloc *1-D Lookup Table* dins el subsistema de distribució de força són els següents:

Parell òptim = [42.44 34.04 25.49 34.04 25.49 42.44 34.04 42.44 16.95 34.04 34.04 34.04] N·m;

Velocitat angular = [104.7 130.9 157.1 183 209 236 262 288 314 340 367 419] rad/s.

Pel que fa al fitxer *time-elecloss.mat*, que fa referència a les pèrdues provocades pel sistema elèctric del cotxe, s'han considerat constants al llarg del cicle de conducció i els valors són els següents:

Pèrdues elèctriques = [500 500 500 500 500 500 500 500 500 500 500 500 500] W;

Temps = [0 100 200 300 400 500 600 700 800 900 1000 1100 1180] s.

Considerant que les proves s'han realitzat amb el cicle estàndard de conducció NEDC i que aquest no té en compte els possibles desnivells de la carretera, el valor del pendent de la carretera al llarg de tot el cicle de conducció serà 0 %.

Aquesta informació es troba en el fitxer *time-slope.mat* i el seu contingut és el següent:

Pendent = [0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0] %;

Temps = [0 100 200 300 400 500 600 700 800 900 1000 1100 1180] s.

En referència a les marxes utilitzades en la caixa de canvis del sistema de transmissió del vehicle, aquestes venen determinades pel cicle de conducció estàndard NEDC. [33]

Aquesta informació es troba en el fitxer *time-gear.mat* i el seu contingut és el següent:

N° de marxa = [0 0 1 1 1 0 0 1 1 2 2 2 0 0 1 1 2 2 3 3 3 3 2 0 0 0 1 1 1 0 0 1 1 2 2 2 0 0 1 1 2 2 3 3 3 3 2 0 0 0 1 1 1 0 0 1 1 2 2 2 0 0 1 1 2 2 3 3 3 3 2 0 0 0 1 1 1 0 0 1 1 2 2 2 0 0 1 1 2 2 3 3 3 3 2 0 0 0 1 1 1 0 0 1 1 2 2 2 0 0 1 1 2 2 3 3 3 3 2 0 0 0 1 1 1 0 0 1 1 2 2 2 0 0 1 1 2 2 3 3 3 3 2 0 0 0 1 1 2 2 3 3 4 5 4 4 4 5 5 5 5 5 5 5 0 0];

Temps = [0 11 15 23 25 28 49 54 56 61 85 93 96 117 122 124 133 135 143 155 163 176 178 185 188 195 206 210 218 220 223 244 249 251 256 280 288 291 312 317 319 328 330 338 350 358 371 373 380 383 390 401 405 413 415 418 439 444 446 451 475 483 486 507 512 514 523 525 533 545 553 566 568 575 578 585 596 600 608 610 613 634 639 641 646 670 678 681 702 707 709 718 720 728 740 748 761 763 770 773 780 800 805 807 816 818 826 828 841 891 899 968 981 1031 1066 1096 1116 1126 1142 1150 1160 1180] s.

Pel que fa al parell màxim que pot proporcionar el motor elèctric, les dades introduïdes en el bloc *1-D Lookup Table* del bloc frenada regenerativa són les següents:

Parell màxim elèctric = [305 305 305 305 305 244 203.3 174.3 152.5 135.6 122 110.9 101.7 93.8 87.1 81.3 76.3 71.8 67.8 47.7] N·m;

Velocitat angular = [0.00 24.61 49.22 73.83 98.44 123.05 147.65 172.26 196.87 221.48 246.09 270.70 295.31 319.92 344.53 369.14 393.75 418.36 442.96 628.32] rad/s.

A continuació es presenten els consums instantanis del motor de combustió introduïts en el bloc *2-D Lookup Table* del bloc del motor de combustió.

Parell mecànic = [0 8.5 17 25.5 34 42.4 51 59.5 67.9 76.5 85 93.4 102] N·m;

Velocitat angular = [0 104.7 130.9 157.1 183.3 209.4 235.6 261.8 288 314.2 340.3 366.5 418.9] rad/s;

Consum instantani = [0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0; 0 0.1513 0.1834 0.2145 0.2451 0.2759 0.3076 0.3407 0.3773 0.4200 0.4701 0.5290 0.6789; 0 0.1984 0.2423 0.2851 0.3274 0.3700 0.4135 0.4584 0.5068 0.5612 0.6231 0.6938 0.8672; 0 0.2455 0.3011 0.3557 0.4098 0.4642 0.5194 0.5761 0.6362 0.7024 0.7761 0.8585 1.0555; 0 0.2925 0.3599 0.4263 0.4922 0.5583 0.6253 0.6937 0.7657 0.8436 0.9290 1.0233 1.2438; 0 0.3396 0.4188 0.4969 0.5746 0.6525 0.7312 0.8114 0.8951 0.9849 1.0820 1.1880 1.4321; 0 0.3867 0.4776 0.5675 0.6570 0.7466 0.8371 0.9291 1.0246 1.1261 1.2350 1.3528 1.6204; 0 0.4338 0.5365 0.6381 0.7393 0.8408 0.9430 1.0468 1.1540 1.2673 1.3880 1.5175 1.8087; 0 0.4808 0.5953 0.7087 0.8217 0.9349 1.0490 1.1645 1.2835 1.4085 1.5410 1.6823 1.9970; 0 0.5279 0.6541 0.7793 0.9041 1.0291 1.1549 1.2822 1.4129 1.5497 1.6940 1.8470 2.1852; 0 0.5279 0.6689 0.8146 0.9659 1.1232 1.2608 1.3998 1.5424 1.6910 1.8470 2.0118 2.3735; 0 0.5279 0.6689 0.8146 0.9659 1.1232 1.2873 1.4587 1.6395 1.8322 1.9999 2.1766 2.5618; 0 0.5279 0.6689 0.8146 0.9659 1.1232 1.2873 1.4587 1.6395 1.8322 2.0382 2.2589 2.7501] g/s.

Pel que fa al rendiment del motor elèctric, dades utilitzades en el bloc 2-D *Lookup Table* del sistema motor elèctric, la informació introduïda és la següent:

Parell elèctric = [-305 -275 -245 -215 -185 -155 -125 -95 -65 -35 -5 0 5 35 65 95 125 155 185 215 245 275 305] N·m;

Velocitat angular = [0 52.4 104.7 157.1 209.4 261.8 314.2 366.5 418.9 471.2 628.3] rad/s;

Rendiment = [0.8598 0.5320 0.6840 0.6840 0.6840 0.6840 0.6840 0.6840 0.6840 0.6840 0.6840 0.6840; 0.8598 0.5605 0.7030 0.7030 0.7030 0.7030 0.7030 0.7030 0.7030 0.7030 0.7030 0.7030; 0.8598 0.5890 0.7220 0.7220 0.7220 0.7220 0.7220 0.7220 0.7220 0.7220 0.7220 0.7220; 0.8598 0.6175 0.7410 0.7410 0.7410 0.7410 0.7410 0.7410 0.7410 0.7410 0.7410 0.7410; 0.8598 0.6460 0.7695 0.8170 0.8170 0.8170 0.8170 0.8170 0.8170 0.8170 0.8170 0.8170; 0.8598 0.6840 0.7885 0.8360 0.8360 0.8360 0.8360 0.8360 0.8360 0.8360 0.8360 0.8360; 0.8598 0.7220 0.8170 0.8550 0.8740 0.8740 0.8740 0.8740 0.8740 0.8740 0.8740 0.8740; 0.8598 0.7600 0.8455 0.8740 0.8835 0.8930 0.9025 0.9025 0.9025 0.9025 0.9025 0.9025; 0.8598 0.8075 0.8645 0.8835 0.9025 0.9025 0.9120 0.9120 0.9025 0.9025 0.9025 0.9025; 0.8598 0.8550 0.8930 0.8930 0.9025 0.9025 0.9025 0.9025 0.9025 0.9025 0.9025 0.9025; 0.8598 0.8265 0.8075 0.7885 0.7790 0.7695 0.7695 0.7600 0.7600 0.7505 0.7505; 0.8598 0.8598 0.8598 0.8598 0.8598 0.8598 0.8598 0.8598 0.8598 0.8598 0.8598 0.8598; 0.8598 0.8598 0.8598 0.8598; 0.8598 0.8265 0.8075 0.7885 0.7790 0.7695 0.7695 0.7600 0.7600 0.7505 0.7505; 0.8598 0.8550 0.8930 0.8930 0.9025 0.9025 0.9025 0.9025 0.9025 0.9025 0.9025; 0.8598 0.8075 0.8645 0.8835

0.9025 0.9025 0.9120 0.9120 0.9025 0.9025 0.9025; 0.8598 0.7600 0.8455
0.8740 0.8835 0.8930 0.9025 0.9025 0.9025 0.9025 0.9025; 0.8598 0.7220
0.8170 0.8550 0.8740 0.8740 0.8740 0.8740 0.8740 0.8740 0.8740; 0.8598
0.6840 0.7885 0.8360 0.8360 0.8360 0.8360 0.8360 0.8360 0.8360 0.8360;
0.8598 0.6460 0.7695 0.8170 0.8170 0.8170 0.8170 0.8170 0.8170 0.8170
0.8170; 0.8598 0.6175 0.7410 0.7410 0.7410 0.7410 0.7410 0.7410 0.7410
0.7410 0.7410; 0.8598 0.5890 0.7220 0.7220 0.7220 0.7220 0.7220 0.7220
0.7220 0.7220 0.7220; 0.8598 0.5605 0.7030 0.7030 0.7030 0.7030 0.7030
0.7030 0.7030 0.7030 0.7030; 0.8598 0.5320 0.6840 0.6840 0.6840 0.6840
0.6840 0.6840 0.6840 0.6840 0.6840].

5.2 Anàlisi del funcionament del simulador

L'objectiu d'aquest subapartat és comprovar el correcte funcionament del simulador, així com mostrar la informació que proporciona a través dels seus visors i destaca els aspectes més importants d'aquesta informació.

Per aquest apartat s'ha realitzat una sola simulació amb els paràmetres detallats anteriorment respecte a les característiques del vehicle i el seu entorn d'ús.

Pel que fa al *SOC mínim*, paràmetre que s'introdueix al programa a través del bloc mode d'operació i que fa referència a l'estat de càrrega mínima de la bateria per funcionar amb mode híbrid o elèctric, s'ha utilitzat un valor constant del 80 %.

Respecte a la *Potència mínima d'engegada del motor de combustió RPM1*, dada també introduïda a través del mateix bloc i que fa referència al punt de canvi de funcionament d'elèctric pur a híbrid, es pren un valor constant de 10.750 W, el que representa un 25% de la potència màxima del motor de combustió de 43 KW.

En la figura següent, es mostra la comparació de la velocitat requerida pel conductor respecte a la velocitat real que proporciona el cotxe, informació extreta del visor *Speed comparison* del bloc conductor.

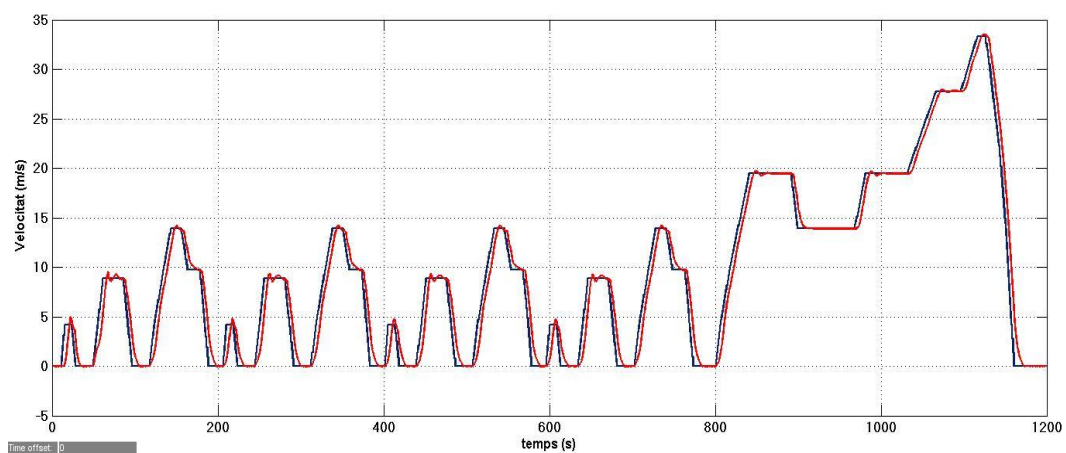


Figura 5.1 Velocitat real del vehicle respecte la requerida pel conductor

En la figura anterior es pot veure com la velocitat del vehicle en vermell, intenta seguir la velocitat d'entrada requerida pel conductor en blau i que representa el cicle de conducció estàndard NEDC.

Considerant que el sistema no és lineal, principalment degut als canvis de mode de funcionament, el error és petit, tant sols hi ha un petit retard en la senyal provocat pel bloc *delay*, el qual garanteix l'estabilitat de la simulació. Tenint en compte l'objectiu d'aquest estudi energètic es considera que l'error proporcionat pel controlador és acceptable.

Seguidament es representa gràficament els modes d'operació que utilitza el vehicle híbrid elèctric al llarg del cicle de conducció, informació extreta del visor *Operation mode* del sistema mode d'operació.

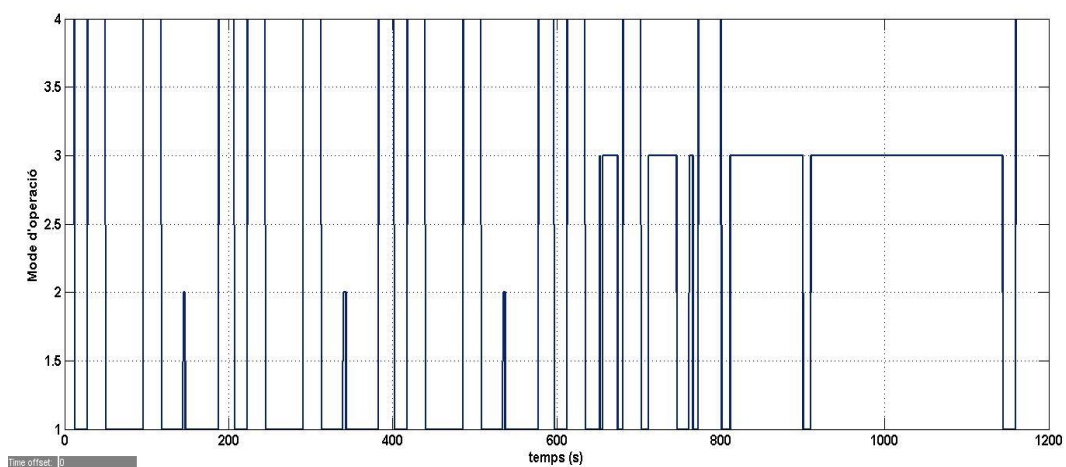


Figura 5.2 Mode d'operació del vehicle

En la figura anterior es pot veure com els modes de funcionament van canviant al llarg del cicle de conducció en funció dels paràmetres establerts en l'estratègia de control del vehicle, situats en el bloc mode d'operació.

En la primera part del cicle, corresponent al cicle de conducció urbà, el mode de funcionament es va alternant entre el mode 1, motor elèctric pur i el mode 4, on es realitza una recàrrega de la bateria quan el vehicle està aturat en un semàfor o stop.

En aquest cas el mode d'operació híbrid 2, només entra en funcionament en certs trams del cicle urbà, quan la potència requerida pel conductor és elevada.

En el cicle de conducció extra urbà, en el tram final del cicle, es pot veure que bàsicament funciona en mode d'operació 3, motor convencional pur. La causa d'això és que la potència requerida en aquest tram és gran i no hi ha suficient nivell de bateria SOC per poder-se activar el mode híbrid.

Seguidament es mostra informació sobre el consum de combustible acumulat del vehicle híbrid elèctric al llarg del cicle de conducció. Aquesta informació ha sigut obtinguda a través del visor *Accumulated fuel consumption*, del bloc del motor de combustió.

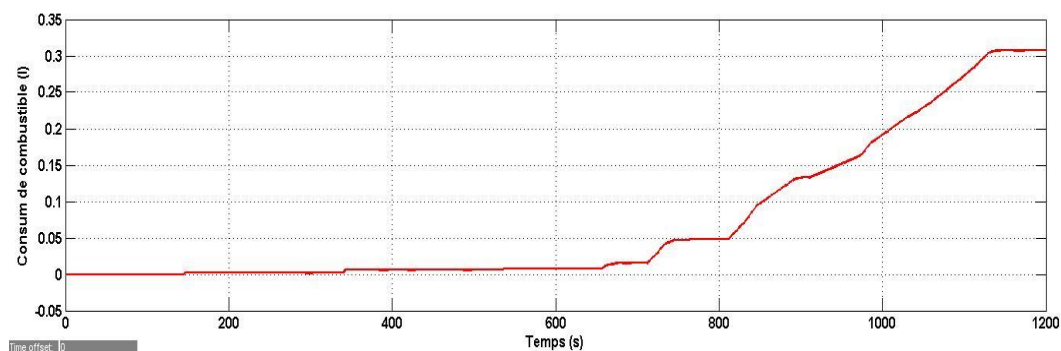


Figura 5.3 Consum de combustible del vehicle (l)

En la figura es mostra com el consum és pràcticament zero en el primer tram del cicle de conducció, corresponent al cicle de conducció urbà, ja que en aquest tram tant sols s'activa el motor de combustió en moments puntuals i en mode híbrid.

Quant s'inicia el cicle de conducció extra urbà, el consum de combustible comença a augmentar considerablement a causa de l'ús pràcticament exclusiu del motor de combustió.

Seguidament es comparen les forces de resistència dinàmiques que s'oposen al moviment del vehicle i que són degudes principalment a factors externs del vehicle, com ara les característiques pròpies de la carretera per on aquest circula. La informació següent s'ha extret del visor *Resistance comparison*, visor situat en el bloc dinàmica del vehicle.

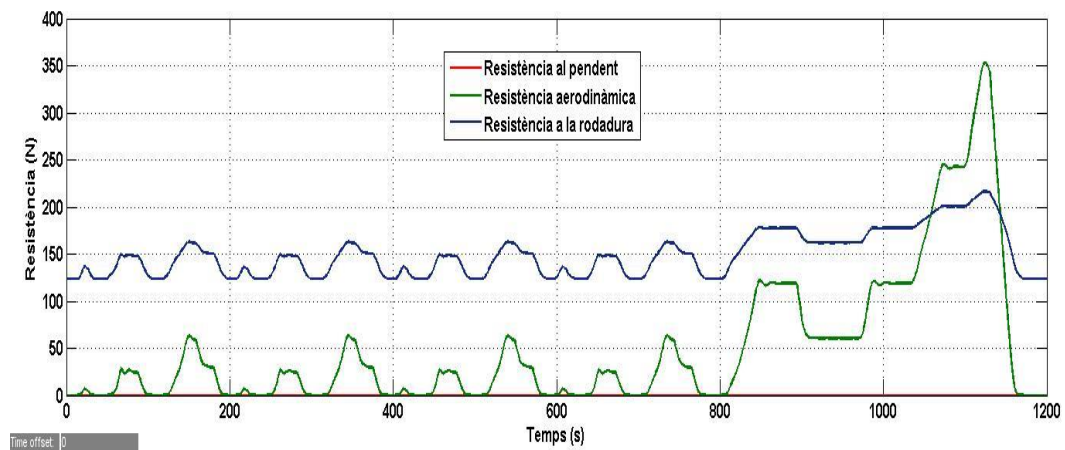


Figura 5.4 Comparació de les forces de resistència dinàmiques

Si s'observa la figura anterior, si ens fixem primer en la resistència deguda al pendent de la carretera, representada amb el color vermell, com que per aquesta simulació no hem considerat el pendent de la carretera ja que no es té en compte en el cicle de conducció estàndard, el valor sempre és zero.

Si comparem la força de resistència al rodament, representada amb el color blau i la força de resistència aerodinàmica, en verd, es pot veure com la resistència al rodament és força superior a l'aerodinàmica i que aquesta es manté pràcticament constant al llarg del cicle de conducció.

Pel que fa a la resistència aerodinàmica, podem observar com aquesta és molt dependent de la velocitat del vehicle i que de fet segueix pràcticament la mateixa distribució que la velocitat del cicle de conducció. Al tenir la velocitat elevada al quadrat en la seva equació, en el tram final, en el cicle de conducció extra urbà on la velocitat és elevada aquesta resistència supera a la de rodament.

A continuació es mostra el nivell de càrrega de la bateria SOC al llarg del cicle de conducció, informació obtinguda amb el visor *SOC1* situat en el sistema bateria del simulador.

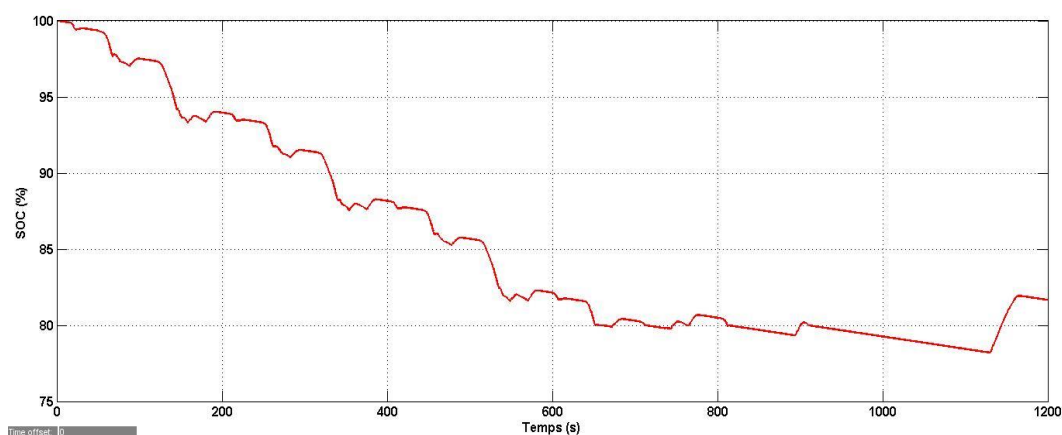


Figura 5.5 SOC de la bateria

En la figura anterior es veu com a partir del SOC inicial de la bateria de valor 100 %, la bateria es va descarregant a poc a poc fins arribar al voltant del 80 %, on el nivell s'estabilitza i en el tram final la bateria es recarrega de nou.

El descens inicial es deu a l'ús intensiu del motor elèctric en el tram de conducció urbà. Aquest descens constant es produeix fins al *SOC mínim*, valor introduït com a variable d'entrada en l'estratègia energètica del vehicle.

A partir d'aquí el motor elèctric deixa de funcionar i s'activa el motor de combustible, estabilitzant el nivell de la bateria i inclús recarregant-la en el tram final, on hi ha una forta reducció de velocitat i per tant es posa en funcionament el fre regeneratiu del vehicle.

Amb aquesta imatge es pot comprovar com el controlador del vehicle, modelitzat amb el sistema mode d'operació, realitza la seva feina correctament, buscant la eficiència global del cicle de conducció.

5.3 Anàlisi de l'estratègia energètica del vehicle

A continuació es mostren els resultats d'una sèrie de simulacions realitzades amb el simulador realitzat amb el programa SIMULINK® per aquest estudi.

L'objectiu d'aquestes simulacions és determinar com influeixen els paràmetres de control de l'estratègia energètica del vehicle, situats en el sistema mode d'operació, a l'eficiència global d'aquest.

Per realitzar aquest anàlisi de sensibilitat, en primer lloc es fixa la variable *RPM1*, que fa referència a la potència mínima d'engegada el motor de combustió i es va variant el valor de la variable *SOC mínim*, que fa referència al nivell mínim de la bateria on el motor elèctric deixa de funcionar.

En la segona part de l'anàlisi, es fixa el *SOC mínim* de la bateria i es va variant la potència mínima d'engegada del motor de combustió.

Aquests paràmetres de control es poden canviar mitjançant el bloc de mode d'operació, situat en el simulador.

A continuació en la taula següent, es mostren els resultats de la primera part de l'anàlisi fixant la variable *RPM1* al mateix valor utilitzat per la simulació anterior 10.750 W, que representa el 25% de la potència nominal del motor de combustió.

RPM1 (W)	SOC mínim (%)	SOC final (%)	Error SOC	Consum de combustible (l)
10.750	90	91,67	1,67	0,39
10.750	80	81,66	1,66	0,31
10.750	70	71,70	1,70	0,23
10.750	60	62,24	2,24	0,17
10.750	50	52,78	2,78	0,12
10.750	40	43,10	3,10	0,10
10.750	30	37,08	7,08	0,08
10.750	20	37,08	7,08	0,08
10.750	10	37,08	7,08	0,08

Taula 5.2 Comparació valors SOC mínim

Com es pot veure en la taula superior, al disminuir el valor del *SOC mínim*, disminueix també el consum de combustible del motor de combustió. No obstant, aquesta disminució no és lineal sinó exponencial, com es pot apreciar en la figura següent.

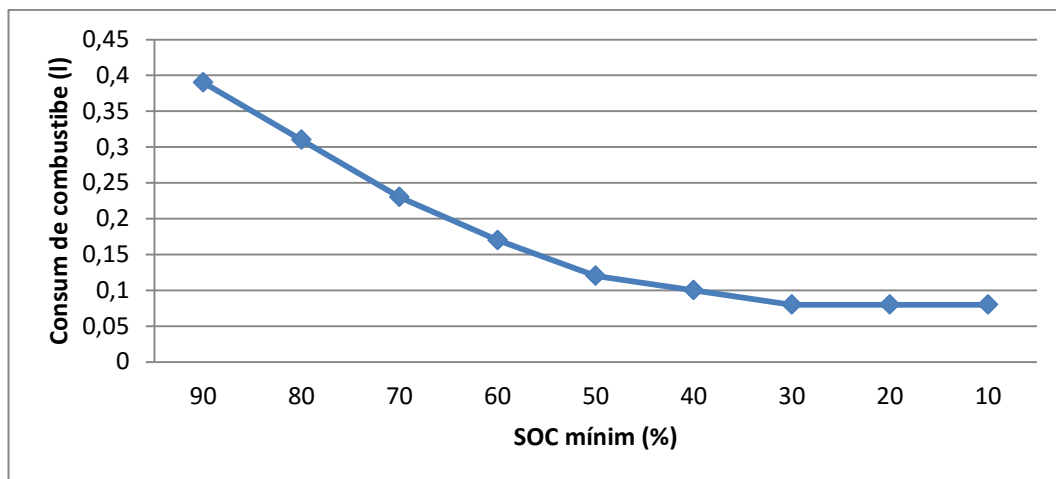


Figura 5.6 Consum de combustible em funció del SOC mínim

Com es pot veure en la figura anterior, el consum de combustible s'estabilitza a partir de valors de *SOC mínim* inferiors al 30 %. Això es deu a l'avantatge de no calgué activar el motor de combustió en mode convencional per a SOC mínims baixos i a la gran diferència de consums entre el mode de motor de combustió pur i el mode híbrid.

No obstant aquestes dades, s'ha de tenir en compte que deixant la bateria a nivells de SOC baixos provocaria l'ús intensiu del motor de combustió en mode pur en el següent cicle de conducció, amb les conseqüències d'un augment important del consum de combustible degut a la utilització del mode convencional en el cicle urbà.

Per comprovar aquest punt s'ha realitzat una simulació partint d'un estat de càrrega de la bateria del 37,08 %, és a dir, fixant la variable *SOC_i* a l'últim valor del SOC obtingut en el cicle de conducció anterior i utilitzant un SOC mínim de control del 30 %.

Com a resultat tenim que el consum de combustible augmenta fins als 0,41 litres, un valor superior de consum a tots els obtinguts en el primer cicle de conducció com es pot veure en la figura anterior.

Pel que fa al valor del SOC, com es pot observar en la figura següent, de seguida arriba al seu valor límit del 30%, desactivant com a conseqüència d'això el motor elèctric.

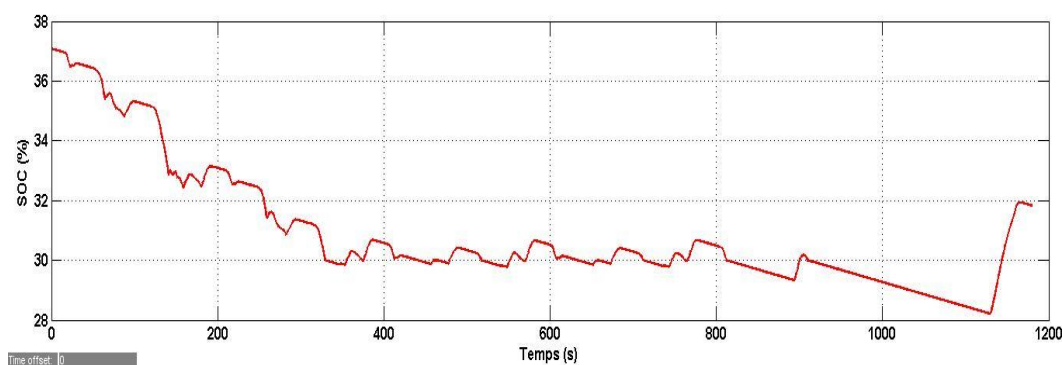


Figura 5.7 SOC de la bateria per al segon cicle de conducció

En el moment de determinar els paràmetres de control en el disseny del vehicle, serà essencial trobar l'equilibri pel valor del SOC *mínim* que permeti l'absència ha ser possible en tot moment, de l'ús del motor de combustió en mode pur i garantir així l'eficiència global del vehicle durant els seus diferents usos.

Aquest equilibri ideal dependrà en gran mesura de l'ús al qual està destinat el vehicle, és a dir, del tipus de cicle de conducció urbà, extra urbà o mixt que s'espera d'ell. Per tant, el tipus de cicle de conducció que realitzi un conductor habitualment influirà enormement en l'eficiència global del vehicle.

Mitjançant la tecnologia *plug-in*, que permet la recàrrega de la bateria de forma externa connectant el vehicle a la xarxa elèctrica, s'evita en gran part la importància d'aquest paràmetre de control i pot prendre valors molt més baixos.

En la taula següent es mostren els resultats del segon anàlisi realitzat en aquest subapartat. Aquest cop s'ha fixat el SOC *mínim* i es va variant el valor de la potència d'engegada del motor de combustió.

Aquest valor de SOC *mínim* es fixa al 80 %, valor també utilitzat en el primer anàlisi d'aquest estudi.

SOC mínim (%)	% Potència nominal motor de combustió	Potència d'engegada motor de combustió (W)	SOC final (%)	Consum de combustible (l)
80	90	38700	81,65	0,31
80	80	34400	81,66	0,31
80	70	30100	81,65	0,31
80	60	25800	81,66	0,31
80	50	21500	81,65	0,31

80	40	17200	81,66	0,31
80	30	12900	81,66	0,31
80	20	8600	81,70	0,30
80	10	4300	81,70	0,30

Taula 5.3 Comparació valors Potència d'engegada del motor de combustió

Com es pot observar en la taula superior, el consum de combustible pràcticament no varia al anar canviant el valor de la potència d'engegada del motor de combustió i tant sols hi ha una reducció del consum en les dos últimes potències.

Si s'hagués introduït al simulador mapes de consums instantanis amb més dades possiblement la informació hagués variat més, tot i així, les diferències no serien importants.

No obstant al que cabria pensar, de que com més tard s'activa el motor de combustió millors resultats en referència a l'eficiència energètica del vehicle, aquí podem comprovar que no sempre és així i que encara que els motors de combustió són més eficients funcionant a potències elevades pròximes a la nominal, hi ha factors molt més importants en l'eficiència global dels vehicles híbrids elèctrics.

Permetre l'activació del motor de combustió en el començament del cicle, com passa en els dos últims valors de la taula i per tant l'activació del mode híbrid aviat, possibilita que el nivell de la bateria es mantingui alt durant tot el cicle de conducció urbà i d'aquesta manera es pot utilitzar l'energia emmagatzemada quan realment és necessària, que és en els pics de potència que es produeixen en els cicles de conducció extra urbans amb velocitats altes.

En canvi, si tardem molt en activar el motor de combustió, la bateria es descarregarà ràpidament i en el moment de demanda alta de potència no hi haurà la possibilitat d'activar el mode híbrid, tinguent que utilitzar el motor de combustió en mode convencional, amb els alts consums de combustible que això representa.

Comparant els dos anàlisis es pot veure que el paràmetre SOC *mínim* és molt més important que la potència on s'activa el motor de combustió.

Per tant podem concloure que l'estratègia de control del vehicle, determinada pel controlador i principalment pel SOC de la bateria, la qual determina la combinació ideal dels dos motors per tal d'aconseguir l'eficiència global més

òptima al llarg del cicle de conducció, és molt més important que el grau d'eficiència individual que puguin tenir cada un dels motors per separat i que l'impacte que aquesta eficiència individual té respecte al consum de combustible del vehicle.

5.4 Anàlisi dels diferents tipus de vehicles

L'objectiu d'aquest anàlisi és determinar les diferències respecte el comportament energètic entre els diferents tipus de cotxes principals que existeixen en el mercat i així poder determinar que aporten els vehicles híbrids elèctrics respecte l'estalvi de combustible i la reducció de la contaminació atmosfèrica.

Per realitzar aquesta comparació s'han utilitzat els interruptors manuals situats en el sistema mode d'operació destinats a aquest fi. Aquests interruptors fixen el mode d'operació a vehicle híbrid, vehicle convencional o vehicle elèctric.

Durant la simulació del vehicle convencional igualment s'ha desactivat el sistema de frenada regenerativa, mitjançant l'interruptor manual situat en el bloc [Sistema de frenada regenerativa](#), ja que aquest tipus de cotxe no incorpora aquest sistema de recuperació d'energia.

Per obtenir el valor de l'energia recuperada s'ha utilitzat el visor *Recovered energy*, situat en el bloc del motor elèctric, [Sistema motor elèctric](#).

Per al cotxe híbrid s'ha utilitzat un SOC mínim constant del 80 % i una potència d'engegada del motor de combustió del 20 % de la seva potència nominal. A continuació es presenten els resultats obtinguts amb el model SIMULADOR realitzat amb SIMULINK®.

Tipus de vehicle	SOC final (%)	Consum de combustible (l)	Estalvi de combustible (%)	Energia recuperada (J)
Convencional	90,36	0,52	0	0
Híbrid	81,86	0,30	42,31	942500
Elèctric	30,84	0	100	781760

Taula 5.4 Comparació dels tipus de vehicle

Pel que fa a l'energia recuperada, el vehicle híbrid és qui recupera més energia dels tres, seguit del elèctric i per últim el convencional, que no recupera energia al no incorporar el sistema de frenada regenerativa.

S'ha de tenir en compte però, que aquest valor superior en l'energia recuperada del cotxe híbrid respecte l'elèctric, és deu principalment a que al híbrid està afegida l'energia proporcionada pel motor de combustió quan el vehicle es troba aturat, és a dir, quan s'activa el mode de funcionament 4 o quan funciona en mode híbrid i la potència requerida pel conductor és inferior a la que pot proporcionar el motor de combustió funcionant de manera òptima.

Per tant, l'energia recuperada globalment pel vehicle híbrid seria la mateixa que la recuperada pel elèctric i que és la proporcionada pel fre regeneratiu en ambdós casos.

El funcionament del mode 4, de recàrrega de la bateria, permet allargar la durada de la bateria en els cotxes híbrids, en contrapartida però, suposa un cert consum de combustible.

Pel que fa a l'estalvi de combustible, es veu un estalvi important del vehicle híbrid respecte del convencional, situat al voltant del 40 % per aquest cas. Lògicament aquest valor dependrà de les característiques pròpies de cada vehicle i variarà molt en funció del model utilitzat i del cicle de conducció realitzat.

No obstant el vehicle elèctric presenta un estalvi de combustible del 100%, s'han de tenir en compte les limitacions actuals de la capacitat d'emmagatzematge de les bateries elèctriques i per tant, del rang de conducció màxim que pot proporcionar un vehicle elèctric entre recàrrega i recàrrega.

A més a més, des del punt de vista mediambiental i econòmic, cal pensar en els orígens primaris d'aquesta energia elèctrica, així com en les característiques pròpies de la xarxa elèctrica, que dependran en gran mesura del model energètic de cada regió i que faran variar l'impacte ambiental global i la contaminació final d'aquests vehicles.

Per comprovar aquestes limitacions de rang màxim de conducció, pel que fa als vehicles elèctrics, s'han realitzat una sèrie de simulacions per poder calcular la distància màxima recorreguda pel vehicle elèctric.

Per aconseguir aquest valor s'ha repetit el cicle de conducció estàndard fins ha esgotar el SOC de la bateria del vehicle elèctric i s'ha comprovat després la

distància recorreguda mitjançant el visor *Distance*, situat en el bloc de dinàmica del vehicle, [Sistema dinàmica del vehicle](#).

Per a cada inici del nou cicle s'ha variat el SOC inicial de la bateria, agafant l'últim valor SOC de l'anterior cicle. Aquestes modificacions es realitzen a través del *workspace* del programa, canviant el valor de la variable *SOCi* en %. En la següent taula es mostren els resultats obtinguts.

Temps de conducció cc 1 (s)	Temps de conducció cc 2 (s)	Temps de conducció total (s)	Distància recorreguda cc 1 (km)	Distància recorreguda a cc 2 (km)	Distància recorreguda total (km)
1180	837,82	2017,82	11,02	4,37	15,39

Taula 5.5 Temps i distància recorreguda pel vehicle elèctric

Com es pot comprovar en la taula anterior, per al segon cicle de conducció estàndard cc 2, la bateria ja s'esgota totalment, sense poder acabar el cicle complet estàndard de 1180 segons de duració.

La distància recorreguda màxima del vehicle elèctric per aquest cas ha sigut de 15,39 km, funcionant un total de 0,56 hores.

Lògicament, els vehicles elèctrics actuals disposen de bateries amb més capacitat d'emmagatzematge d'energia elèctrica que les utilitzades en els vehicles híbrids elèctrics.

No obstant això, els preus de les bateries, el volum que ocupen i el seu pes, també són més grans i els rangs de conducció que poden oferir ara per ara continuen sen limitats.

5.5 Anàlisi de la fidelitat del model creat

Per tal de comprovar l'ajust del model creat amb SIMULINK® amb un vehicle híbrid elèctric real, a continuació es compara el resultat obtingut amb la primera simulació, en referència al consum de combustible del vehicle, respecte les dades oficials de consums.

El model del vehicle estudiat correspon al primer Prius desenvolupat per Toyota entre els anys 1997-2001 i aquesta versió (NHW10) només es va vendre al Japó. Posteriors versions de la primera generació del model es van vendre a altres països, però amb motors més potents. [30]

Per tant només existeixen dades oficials obtingudes amb el test japonès *Mode 10-15*. Aquest test és un cicle de conducció estàndard japonès que certifica les emissions contaminants i els consums de combustible pels turismes que es venen al Japó.

Cal considerar en aquest punt, que els tests intenten reflectir les condicions de conducció típiques de cada zona i que per tant els resultats poden variar molt, pel mateix model de cotxe, entre els diferents tests estàndard que existeixen al món, com el test EPA d'Estats Units.

El consum oficial pel model estudiat, Prius 1^a Generació NHW10, realitzat amb el test estàndard Mode 10 – 15 correspon a 28 Km/l, és a dir, 0,0357 l/km. [31]

Per altra banda, com s'ha comentat anteriorment, no s'han tingut en compte les pèrdues d'energia degudes a les resistències de fricció internes o als components auxiliars del vehicle.

En la taula següent es mostra com es distribueixen les pèrdues energètiques entre les diferents parts del vehicle híbrid elèctric, en un cicle de conducció combinat.

Sistema del vehicle	Requeriments d'energia %
Pèrdues del motor de combustió (ineficiència de la combustió, fricció del motor, calor, etc.)	65 – 69
Pèrdues paràsites (bomba d'aigua, alternador, etc.)	4 - 6
Pèrdues del tren de tracció	3 - 5
Potència a les rodes (resistència del vent, resistència al rodament i frenada)	27 - 38
Pèrdues en ralentí	≈ 0
Energia recuperada en la frenada regenerativa	5 - 9

Taula 5.6 Requeriments d'energia d'un vehicle híbrid elèctric [32]

Per tant, tenint en compte aquesta taula, les pèrdues que no s'han tingut en compte en el model representen al voltant del 7 al 11 % de l'energia total necessària per moure el vehicle (Pèrdues paràsites + Pèrdues tren de tracció).

A continuació en la taula següent es mostra l'error relatiu del model creat amb SIMULINK® respecte les dades oficials de consums de combustible i tenint en compte les pèrdues no considerades en el model.

Consum oficial (l/km)	Consum oficial sense pèrdues per fricció o paràsites (l/km)	Consum obtingut amb el model (l/km)	Error (%)
0,0357	0,0318 – 0,0332	0,028	11,95 – 15,66

Taula 5.7 Error relatiu de la fidelitat del model creat

Tenint en compte la poca quantitat d'informació de que es disposa del fabricant del vehicle, pel que fa a alguns components o estratègies utilitzades i que l'objectiu de l'estudi no era ajustar el simulador a un model de vehicle concret, es considera que aquesta versió del model creat amb SIMULINK® és una aproximació de la realitat acceptable, poden ajustar encara més el model a la realitat en futures versions del model inicial SIMULADOR.

Per ajustar el simulador a un model de cotxe en concret, seria necessari disposar de totes les característiques tècniques del vehicle i dels seus components, així com dels paràmetres de control utilitzats en l'estratègia energètica del vehicle.

En cas de disposar tan sols de les característiques tècniques dels components del vehicle, una opció per ajustar el simulador seria la realització d'un anàlisi de sensibilitat amb els dos paràmetres de control del bloc mode d'operació (*RPM1* i *SOC mínim*).

Es tindrà que anar variant el valor d'aquests dos paràmetres fins aconseguir que el consum de combustible del simulador coincideixi amb el consum oficial obtingut mitjançant algun test estàndard.

6 Conclusions

En la primera part del present estudi s'ha vist la gran dependència que hi ha entre el transport i la creació de riquesa en la societat actual i a la vegada la gran quantitat d'energia que consumeix el transport i l'impacte que té aquest consum en la contaminació del medi ambient i particularment en el canvi climàtic.

En els pròxims anys la demanda de vehicles alternatius més eficients i sostenibles creixerà d'una forma important, tant per la preocupació mediambiental de la societat, com pels preus alts dels combustibles i de l'energia en general.

Entre aquests vehicles alternatius el vehicle híbrid elèctric jugarà un paper clau, sobretot en els pròxims anys de transició, a l'espera d'una millora en la tecnologia utilitzada en les bateries elèctriques.

Com s'ha vist, a l'hora de dissenyar aquests vehicles resulta imprescindible la utilització d'eines informàtiques que permetin la realització de simulacions i escenaris i d'aquesta manera ajustar els paràmetres de control del vehicle per tal de que la combinació entre tots els elements resulti en una eficiència òptima al llarg de tot el cicle de conducció.

Per altra banda, s'ha de tenir en compte que aquest cicle de conducció afecta decisivament a l'eficiència global del recorregut realitzat pel vehicle híbrid i per tant, es necessari que els fabricants d'automòbils adaptin cada vegada més els vehicles i especifiquin les condicions d'ús preferent per tal que els usuaris seleccionin el vehicle adequat en funció de les seves necessitats de transport, ja sigui per a conducció urbana, com extra urbana, com mixta i al mateix temps que les autoritats competents facilitin informació fiable dels consums reals d'aquests i de com afecten aquests consums d'energia al medi ambient.

Pel que fa als paràmetres de control, s'ha vist la importància de mantenir el SOC de la bateria a nivells alts en tot moment pels vehicles híbrids elèctrics amb motor elèctric de suport, per tal d'aprofitar aquesta energia auxiliar en els moments de pics de potència màxims, que es quan realment es consumeix més combustible i d'aquesta manera augmentar l'eficiència del vehicle.

També cal destacar la importància d'activar el motor de combustió aviat per aquests tipus de vehicle, ja que degut a la poca capacitat de la bateria, si el cotxe funciona molta estona amb el motor elèctric sol, s'arriba aviat als límits

inferiors del SOC provocant l'activació del motor de combustió en mode convencional amb els consums alts associats a aquest mode de funcionament. És a dir, el recomanable és que funcionin els dos motors a la vegada com més estona millor, per tal d'aconseguir una òptima eficiència global per tot el cicle de conducció.

Finalment es pot concloure que l'estratègia energètica idònia dependrà de la configuració del vehicle híbrid i de les característiques pròpies dels seus components així com del grau d'híbridació d'aquest i que aquesta estratègia de gestió de l'energia, combinant els fluxos d'energia entre els diferents components del vehicle d'una forma òptima, és molt més important pel que fa a la eficiència global del vehicle, que la eficiència individual que pugui tenir cada component per separat.

7 Recomanacions per a treballs futurs

Un cop analitzats els resultats de les simulacions realitzades amb el model creat amb SIMULINK/MATLAB®, es considera que per a pròximes versions del model seria adequat incorporar les pèrdues energètiques degudes a la fricció interna en el tren de tracció, així com les pèrdues provocades per altres components auxiliars del vehicle, com la bomba d'aigua, ventiladors, etc.

També seria important ajustar els components actuals del model encara més a la realitat, ajustant les eficiències, com ara l'eficiència de la bateria o l'eficiència del canvi de velocitats i a més a més aconseguir que les simulacions siguin més còmodes de realitzar, amb la introducció de les dades al sistema d'una manera més ràpida i còmoda.

Igualment és important comptar per al futur amb més punts d'informació pel que fa als mapes d'eficiència del motor elèctric i del motor de combustió, ja que com més informació continguin aquests mapes més s'ajustarà el sistema a la realitat.

Finalment seria interessant per a properes versions, incorporar en el model la possibilitat de canviar d'una configuració de tren de tracció a un altra, per tal de poder tenir representats en el simulador tots els tipus de cotxes híbrids elèctrics existents en el mercat actual.

8 Valoració econòmica de l'estudi

Aquest document contempla el cost total de la realització de l'estudi *Estudi energètic d'un cotxe híbrid elèctric*.

La valoració econòmica es compon de les següents partides:

- 50 hores d'estudi preliminar del vehicle híbrid elèctric
- 300 hores per a la creació i desenvolupament del simulador amb el programa Matlab/Simulink®
- 45 hores per a la redacció de l'estudi
- 10 hores de desplaçaments varis

Els costos per hora considerats són els següents:

- Honoraris enginyer industrial superior: 40 €/hora
- Desplaçaments: 35 €/hora

La valoració total de l'estudi es mostra en la següent taula.

Concepte	Unitats (h)	Preu unitari (€/h)	Preu concepte (€)
Estudi preliminar del vehicle híbrid elèctric	50	40,00	2.000,00
Creació i desenvolupament del simulador amb el programa Matlab/Simulink	300	40,00	12.000,00
Redacció de l'estudi	45	40,00	1.800,00
Desplaçaments varis	10	35,00	350,00
TOTAL:			16.150,00

Taula 8.1. Valoració econòmica de l'estudi

El cost total del present estudi ascendeix a la quantitat de SETZE MIL CENT CINQUANTA EUROS.

Ginestar, 30 de març de 2016

9 Bibliografia consultada

- [1] https://en.wikipedia.org/wiki/Hybrid_electric_vehicle
- [2] <http://cleantechnica.com/2013/09/30/electric-vehicles-speeding-toward-7-global-sales-2020/>
- [3] <http://earthobservatory.nasa.gov/Features/NightLights/>
- [4] http://ec.europa.eu/eurostat/statisticsexplained/index.php/Consumption_of_energy
- [5] <http://eurlex.europa.eu/legalcontent/ES/TXT/?uri=celex%3A32007R0715>
- [6] http://ec.europa.eu/eurostat/statisticsexplained/index.php/Air_pollution_statistics
- [7] <http://www.worldometers.info/cars/>
- [8] http://www.rita.dot.gov/bts/sites/rita.dot.gov.bts/files/publications/national_transportation_statistics/html/table_01_23.html_mfd
- [9] http://ec.europa.eu/eurostat/statisticsexplained/index.php/Greenhouse_gas_emission_statistics
- [10] <http://visual.ly/global-emissions-kyoto>
- [11] http://ec.europa.eu/eurostat/statisticsexplained/index.php/Climate_change_-_driving_forces
- [12] <http://climate.nasa.gov/vital-signs/global-temperature/>
- [13] <http://www.wri.org/ipcc-infographics>
- [14] Mi, C., Masrur, A. and Gao, D., "Hybrid Electric Vehicles: Principles and Applications with Practical Perspectives", John Wiley & Sons, Ltd, 2011.

-
- [15] <http://www.greencarcongress.com/2014/12/20141210-outlook.html>
- [16] http://www.daukpan.org.uk/peak_oil
- [17] <http://knoema.es/yxptpab/crude-oil-price-forecast-long-term-2016-to-2025-data-and-charts>
- [18] <http://ec.europa.eu/energy/en/statistics/country>
- [19] <http://knoema.es/EIAIES2014Aug/international-energy-statistics-february-2015>
- [20] <http://www.appice.es/app.php?x=3&x2=4>
- [21] Mehrdad, E., Yimin, G. and Emadi, A., "Modern Electric, Hybrid Electric, and Fuel Cell Vehicles: Fundamentals, Theory, and Design" Second Edition, Taylor & Francis Group, LLC, 2010.
- [22] Fuhs, Allen E., "Hybrid vehicles and the future of personal transportation", Taylor & Francis Group, LLC, 2009.
- [23] <http://es.mathworks.com/products/simulink/>
- [24] http://pernerscontacts.upce.cz/20_2010/Novotny.pdf
- [25] <https://sourceforge.net/projects/adv-vehicle-sim/>
- [26] https://en.wikipedia.org/wiki/Internal_combustion_engine#Measures_of_engine_performance
- [27] <http://www.evdrive.com/prototypes/2010/02/22/specifications-and-baseline-performance/>
- [28] Shabbir, W. And Evangelou, S., "Exclusive Operation Strategy for the Supervisory Control of Series Hybrid Electric Vehicles", IEEE TRANSACTIONS ON CONTROL SYSTEMS TECHNOLOGY, January 2016.
- [29] http://ecomodder.com/wiki/index.php/Brake_Specific_Fuel_
-

Consumption_(BSFC)_Maps

- [30] [https://en.wikipedia.org/wiki/Toyota_Prius_\(XW10\)](https://en.wikipedia.org/wiki/Toyota_Prius_(XW10))
- [31] https://en.wikipedia.org/wiki/Toyota_Prius#cite_note-Prius1gen-172
- [32] <https://www.fueleconomy.gov/feg/atv-hev.shtml>
- [33] DIRECTIVA 70/220/CEE, de 20 de marzo de 1970, relativa a la aproximación de las legislaciones de los Estados miembros en materia de medidas que deben adoptarse contra la contaminación del aire causada por los gases procedentes de los motores de explosión con los que están equipados los vehículos a motor.
- [34] Quevedo, J., “Fundamentos del PID”, Revista Automática e Instrumentación, nº 204, pag. 97-101, Juny/Juliol, 1990.
- [35] <https://en.wikipedia.org/wiki/Simulink>
- [36] Chris, M., Masrur, A. and Gao, D., “Hybrid Electric Vehicles: Principles and Applications with Practical Perspectives”, John Wiley & Sons, Ltd, 2011.
- [37] Chan, C.C. "The state of the art of electric and hybrid vehicles", Proceedings of the IEEE, vol.90, no.2, pp.247-275, Feb 2002
- [38] http://www.ie.itcr.ac.cr/einteriano/control/clase/Zomorodi_Shahrokhi_PID_Tunning_Comparison.pdf



ANNEXES

ANNEX I: Recorregut del vehicle

El recorregut que realitza el vehicle i la manera d'actuar del conductor són els dos elements externs que més influeixen en el comportament energètic final de qualsevol vehicle estudiat. Aquests dos factors aportaran les variables externes a la simulació i per tant també es tenen en compte en la simulació del cotxe híbrid elèctric.

Qualsevol vehicle pot realitzar un número infinit de possibles recorreguts i es el factor que proporciona a la simulació els paràmetres externs del pendent del traçat s , la distància respecte el punt inicial d i el temps transcorregut des del punt d'inici t .

Les normatives europees actuals d'homologacions i requisits mediambientals utilitzen diferents tests estàndards per calcular les emissions contaminants i el consum de combustible i s'apliquen a qualsevol vehicle que es vulgui comercialitzar a Europa.

Les proves estàndard es realitzen a laboratoris homologats per avaluar objectivament l'impacte mediambiental dels vehicles i a Europa s'utilitza el cicle de conducció NEDC, *New European Driving Cycle*.

Aquest cicle es representa en funció del temps i de la velocitat del vehicle v , relacionada amb la distància i el temps de recorregut. Igualment el test incorpora informació sobre la marxa a posar en funció del temps.

Consisteix en quatre cicles de conducció ECE-15 *Urban Driving Cycle* UDC repetits i un cicle de conducció extra-urbà *Extra-Urban Driving Cycle* EUDC. En la següent figura es pot observar el cicle total en qüestió NEDC. [33]

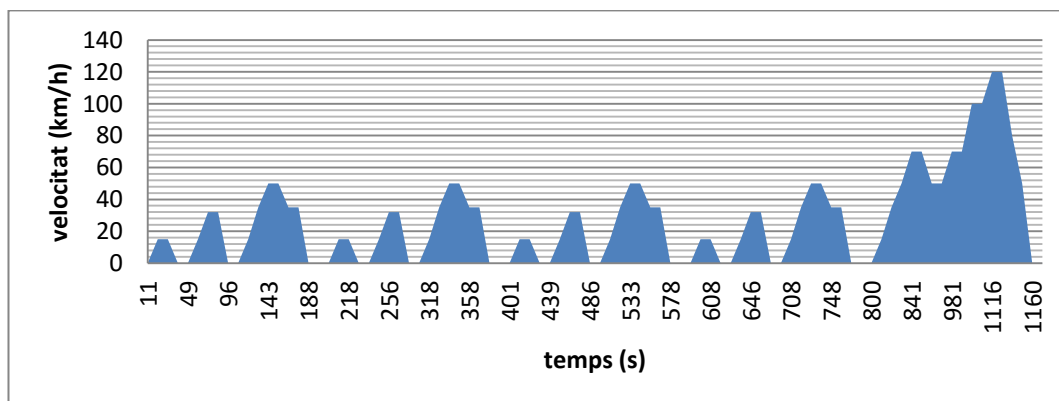


Figura I.1 Cicle de conducció estàndard NEDC [33]

ANNEX II: Controlador PID

No obstant la gran quantitat de nous algorismes avançats de control, més d'un 90 % dels reguladors de processos industrials continuen utilitzant una llei de control del tipus PID, ja que aquests satisfan les necessitats de control (estabilitat, precisió, rapidesa i robustesa) adequadament. [34]

L'objectiu del controlador situat en el bloc del conductor del model SIMULINK®, és que el vehicle segueixi la consigna de velocitat introduïda en el sistema a través del mateix bloc mitjançant el fitxer *time-speed.mat* i que representa el cicle de conducció del vehicle, comentat en l'[Annex I](#).

El regulador PID combina tres accions bàsiques, que són la proporcional (P), la integral (I) i la derivativa (D). L'expressió bàsica del regulador es pot observar en la següent equació;

$$u(t) = K \cdot (e(t) + \frac{1}{T_i} \int_0^t e(s) \cdot ds + T_d \frac{de}{dt}) \quad \text{Eq. II.1}$$

on $u(t)$ és la senyal d'entrada del procés, $e(t)$ és l'error i K , T_i i T_d són els paràmetres del regulador.

Per realitzar el control de velocitat en el bloc conductor s'ha utilitzat una variant del regulador PID tradicional per tal de millorar les seves característiques. La modificació de l'acció proporcional pot aconseguir-se mitjançant la següent equació;

$$P = K(-y) \quad \text{Eq. II.2}$$

on y es la sortida del procés, que en el nostre cas és la senyal *Actual vehicle speed*, provinent del bloc sensor i que indica la velocitat real en que circula el vehicle per la carretera.

Aquesta modificació permet reduir el sobre impuls *overshoot* de la variable controlada quan es produeixen escalons en la senyal d'entrada, pel cas que ens ocupa, fortes acceleracions seguides de trams amb velocitat constant.

En la realitat sempre hi haurà un cert retard entre la voluntat del conductor de conduir a una certa velocitat condicionada per les normes de trànsit i les característiques de la carretera i l'acció aplicada als pedals del cotxe i posteriorment als elements de tracció i frenada del vehicle.

Per tant no es considera necessari incorporar l'acció derivativa en el regulador, ja que aquesta és l'encarregada d'accelerar la resposta del procés quan es produeixen canvis en la consigna, que en el nostre cas es la velocitat desitjada pel conductor.

La modificació realitzada en l'acció proporcional i l'esquema de control triat pel bloc conductor del simulador es pot veure representat en la següent figura.

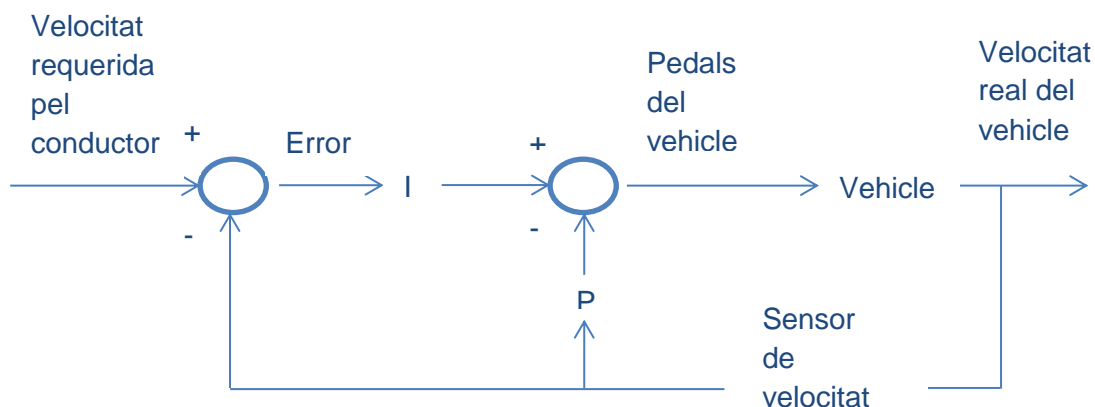


Figura II.1 Esquema de control utilitzat en el simulador

Com podem observar en la figura anterior, a la velocitat desitjada pel conductor se li resta la velocitat real en que circula el vehicle, obtinguda a través del sensor de velocitat del vehicle.

Un cop calculat l'error de la senyal de consigna, a aquest se li aplica l'acció integral I i posteriorment se li resta l'acció proporcional P per tal d'aconseguir la senyal dels pedals del vehicle.

Els pedals d'acceleració i de fre actuaran segons convingui en el sistema vehicle mitjançant els sistemes de tracció i de frenada del vehicle, adequant la velocitat d'aquest a la requerida pel conductor i proporcionant una velocitat de sortida real del vehicle.

Les tècniques empíriques de sintonia en llaç tancat de controladors PID [38] no han pogut ser aplicades, degut a les no linealitats existents en la dinàmica del sistema. Per la qual cosa s'ha optat per realitzar un mètode experimental basat en prova – error fins aconseguir una resposta amb el mínim possible de rebasament i amb el millor temps de resposta possible.

La resposta del sistema es pot veure fàcilment mitjançant el visor *speed comparison*, situat en el bloc conductor del simulador. A partir d'aquesta gràfica s'han anat variant els valors proporcional i integral del controlador PID fins aconseguir que la senyal de la velocitat real del cotxe fos pràcticament igual a la senyal de la velocitat de consigna.

Els paràmetres finals obtinguts en l'experiment han sigut 6, pel cas de l'acció integral I i 26 per l'acció proporcional P .

ANNEX III: Dinàmica del vehicle

El model dinàmic del vehicle híbrid elèctric pot ser obtingut mitjançant la segona llei de Newton considerant totes les forces aplicades al vehicle. En la figura següent [Figura III.1](#), es mostra el vehicle estudiat i les forces associades a ell.

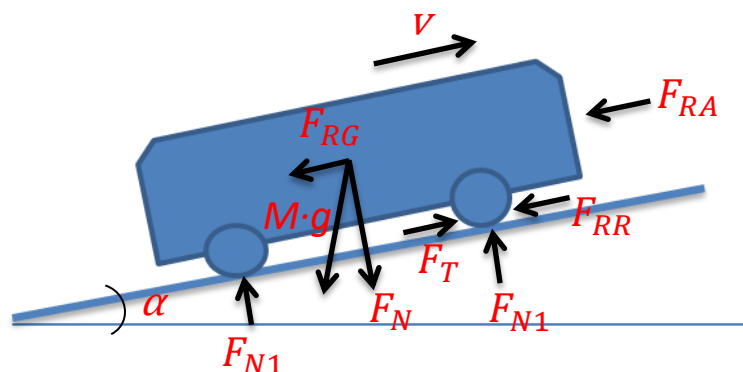


Figura III.1 Dinàmica del vehicle

La força de resistència total F_{RT} , està formada per la força de resistència al rodament F_{RR} , la força de resistència aerodinàmica F_{RA} i la força de resistència a la gravetat F_{RG} , pertant l'[Equació III.1](#) ens queda;

$$F_{RT} = F_{RR} + F_{RA} + F_{RG} \quad \text{Eq. III.1}$$

i tenint en compte la massa del vehicle M i l'acceleració del vehicle a , la força dinàmica F_D es mostra en l' [Equació III.2](#) següent;

$$F_D = F_{RR} + F_{RA} + F_{RG} + Ma \quad \text{Eq III.2}$$

Quan el vehicle es posa en moviment aquesta força dinàmica és la força de tracció del vehicle F_T , que haurà de superar la força de resistència total per aconseguir l'acceleració del cotxe.

III.1. Resistència al rodament

La força de resistència al rodament F_{RR} es produïda pel contacte de la roda amb la superfície i depèn del coeficient de resistència al rodament R_C entre la

carretera i el pneumàtic, de la força normal de reacció F_N i del pes del vehicle, obtingut del producte de la massa del vehicle M pel coeficient de gravetat g .

El coeficient de resistència al rodament varia en funció del material del pneumàtic, la seva estructura, temperatura, pressió, la rugositat i el material de la carretera i l'absència o no de líquid en la ella. Valors típics de coeficients de resistència al rodament es mostren en la següent [Taula III.1](#).

Condicions	Coeficient de resistència al rodament
Pneumàtic de cotxe en carretera de formigó o formigó asfàltic	0.013
Pneumàtic de cotxe en carretera de grava premsada	0.02
Carretera de quitrà	0.025
Camí de terra	0.05
Fora camí	0.1–0.35
Pneumàtic de camió en carretera de formigó o formigó asfàltic	0.006–0.01
Roda de tren en rail	0.001–0.002

Taula III.1 Coeficient de resistència al rodament sota diverses condicions [20]

Per altra banda, aquest coeficient varia en funció de la velocitat, donant lloc al coeficient dinàmic i al estàtic.

Existeixen diverses formules per calcular el coeficient dinàmic basades en resultats experimentals. Pel càlcul del rendiment d'un vehicle és suficient considerar aquesta fricció com una equació lineal en funció de la velocitat.

Per turismes amb pressions de pneumàtic estàndard i velocitats fins als 128 km/h es pot considerar la següent [Equació III.3](#), on la velocitat v es mesurada en km/h i R_{C0} i R_{C1} són els coeficients de resistència al rodament estàtic i dinàmic respectivament. [20]

$$R_{C1} = R_{C0} \left(1 + \frac{v}{160} \right) \quad \text{Eq. III.3}$$

Quan el vehicle no està en moviment i la força de tracció F_T no és prou gran per superar la força de resistència al rodament, aquesta ha de cancel·lar la força de tracció aplicada i/o el pes del vehicle en cas de desnivell, per mantenir el vehicle quiet. Quan el cotxe es posa en moviment la força de resistència al rodament s'oposa al moviment amb una magnitud segons l'[Equació III.4](#).

$$F_{RR} = R_{C1} M g \cos \alpha \quad \text{Eq. III.4}$$

On α és el pendent de la carretera en graus. Tenint en compte que el pendent de la carretera s es proporciona en % i aplicant el teorema de Pitàgores tenim finalment que; [20]

$$F_{RR} = R_{C1} M g \frac{100}{\sqrt{s^2 + 100^2}} \quad \text{Eq. III.5}$$

III.2. Resistència aerodinàmica

Un altra força que s'oposa a l'avanç del vehicle quan aquest està en moviment és la força de resistència aerodinàmica F_{RA} . Aquesta força varia en funció de la velocitat del vehicle, creixent potencialment a mesura que augmenta la velocitat.

Un altre factor a tenir en compte és el coeficient de fregament aerodinàmic D_C que depèn de la forma del vehicle estudiat. A continuació, a la següent [Taula III.2](#) es mostren alguns valors de referència en funció del tipus de vehicle.

Taula III.2 Coeficient de fregament aerodinàmic en funció del tipus de vehicle [20]

Tipus de vehicle	Coeficient de fregament aerodinàmic
Descapotable	0.5-0.7
Furgoneta	0.5-0.7
Cotxe tipus "pontó"	0.4-0.55
Forma tipus falca, fars i para-xocs integrats al cos, baixos del vehicle coberts, flux d'aire de refrigeració optimitzat	0.3-0.4
Rodes i fars integrats al cos, baixos del vehicle coberts	0.2-0.25
Cotxe tipus "Kammback"	0.23
Disseny aerodinàmic òptim	0.15-0.20
Camions i tràilers	0.8-1.5
Autobusos	0.6-0.7
Autobusos aerodinàmics	0.3-0.4
Motocicletes	0.6-0.7

Els altres paràmetres a considerar són la densitat de l'aire A_D , l'àrea frontal del vehicle F_A i la velocitat del vent V_V amb signe positiu quan la direcció del vent és la mateixa que la direcció del vehicle i amb signe negatiu quan la direcció del vent és contrària a la del vehicle.

Tenint en compte tots aquests paràmetres podem observar la força de resistència aerodinàmica en la següent equació;

$$F_{RA} = \frac{1}{2} A_D F_A D_C (V - V_V)^2 \quad \text{Eq. III.6}$$

III.3. Resistència a la gravetat

Quan el vehicle es mou per un cert pendent s , sempre apareix una component horitzontal del pes degut a la força de la gravetat. Aquesta component actuarà com a resistència si el vehicle puja per la pendent i accelerarà el vehicle quan sigui una baixada.

Tenint en consideració l'angle α d'aquest pendent, la massa del vehicle M i la gravetat g , en la següent equació podem veure la resultant d'aquesta força.

$$F_{RG} = Mg \sin \alpha \quad \text{Eq. III.7}$$

Per tal que aquesta força ens quedi en funció del pendent de la carretera s en tant per cent % i aplicant el teorema de Pitàgores com hem fet anteriorment, tenim finalment que; [20]

$$F_{RT} = Mg \frac{s}{\sqrt{s^2 + 100^2}} \quad \text{Eq. III.8}$$